

CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Thelma Solange Piazza Fernandes

Co-orientador:

Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

ANGELO RICARDO RODRIGUES DE SOUZA

**DISSERTAÇÃO APROVADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.**

**Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.^a
Orientadora**

**Prof. Evelio Fernandes, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

Banca Examinadora

**Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.^a (UFPR)
Presidente**

Prof.^a Jamea Cristina Batista Silva, Dr.^a (UTFPR-PR)

Prof.^a Elizete Maria Lourenço, Dr.^a (UFPR)

**Prof.^o Alexandre Rasi Aoki, Dr. (UFPR-LACTEC)
Co-Orientador**

Curitiba, 27 de março de 2009.

DEDICATÓRIA

**“CAMINHANTE, NÃO EXISTE CAMINHO. O CAMINHO SE FAZ AO CAMINHAR”.
DEDICO ESTE TRABALHO A DEUS, AQUELE QUE ABRE AS PORTAS NO CAMINHO
DAQUELE QUE O TRILHA E SABE PARA ONDE VAI. SEM OBJETIVO, O QUE EXISTE É
APENAS O CAMINHO.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha esposa Mari, pela dedicação, compreensão, paciência e apoio. Seu amor me ajuda a ver o caminho e sua força ampara a firmeza e objetividade de meus passos.

Agradeço a minha filhinha Olívia, gerada e concebida no mesmo período deste trabalho, que muitas vezes se viu obrigada a dividir minha atenção com este projeto. Teu sorriso e olhar ternos foram grande combustível para o êxito desta proposta.

À minha orientadora Prof^a Dr^a. Thelma Solange Piazza Fernandes, meu respeito e admiração. Desde o primeiro contato, quando ainda não sabíamos exatamente o objetivo desta caminhada, acreditou na minha capacidade e determinação para alcançar esta meta ousada de retomar os estudos após anos distante da Academia. Muito mais do que conhecimentos técnicos ou frutos acadêmicos, como tese e artigos, meu sincero obrigado pelo exemplo de profissionalismo e respeito à pessoa humana, evidenciados nas dificuldades presentes ao longo desta trilha.

Ao amigo e co-orientador Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki, um profissional competente e comprometido, que não mede esforços para ajudar e contribuir para o sucesso daqueles que se mostram determinados à vitória. Muito obrigado por tornar meu caminho mais tranquilo ao me oferecer uma bolsa de estudos no Lactec, quando tive que optar entre a permanência no trabalho e a realização do mestrado. Sem este apoio, os obstáculos seriam muito maiores, tenho certeza.

Agradeço à banca de avaliação composta pelas Prof^a. Dr^a. Elizete Maria Lourenço e Prof^a. Dr^a. Jamea Cristina Batista Silva. Obrigado pela firmeza e objetividade na avaliação dos resultados desta caminhada.

Às amigas Ana Paula Oening e Débora Cíntia Marcílio, (seres), que sempre se mostraram atenciosas e pacientes para me ensinar a trabalhar com o Matlab. Amizade sincera é aquela que muitas vezes exige sacrifícios, como assistir minhas simulações para apresentação de qualificação e defesa. Meu sincero e verdadeiro obrigado.

Aos amigos do Lactec, Cláudio Vallejos, Itamar Szuvovivski, Diogo Dahlke, Rafael Machado, Luis Pereira, Sebastião Ribeiro, Fábio Guerra, Leonardo Silva, Renata Bachega, Daisy Gomes, Gilson Paulillo e tantos outros que direta ou indiretamente, ajudaram-me a permanecer no caminho correto. Meus sinceros agradecimentos.

Finalmente, agradeço ao Lactec pela oportunidade de trabalho e à Universidade Federal do Paraná pelo primoroso programa de pós-graduação que nos permite fortalecer nossas bases técnica e de relacionamentos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Justificativa.....	12
1.2.	Motivação	14
1.3.	Objetivos	14
1.4.	Organização da Dissertação	15
CAPÍTULO 2.	ESTADO DA ARTE	16
2.1.	Levantamento Bibliográfico	16
2.2.	Tecnologias em Geração Distribuída	22
2.2.1.	Microturbina (MT)	24
2.2.2.	Células a Combustível (Cac).....	27
2.2.3.	Painel Fotovoltaico (PV)	32
2.3.	Benefícios da Aplicação de GDs.....	38
2.4.	Impactos de GDs sobre a Rede de Distribuição	41
2.5.	Considerações Finais.....	44
CAPÍTULO 3.	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	45
3.1.	Introdução.....	45
3.2.	Algoritmos Genéticos (AGs)	45
3.2.1.	Estrutura dos Algoritmos Genéticos (AGs).....	47
3.2.2.	Operadores Genéticos.....	48
3.2.3.	Seleção	48
3.2.4.	Elitismo.....	49
3.2.5.	Roleta	49
3.2.6.	Torneios.....	50
3.2.7.	Amostragem Universal Estocástica	50
3.2.8.	Cruzamento	51
3.2.9.	Mutação	54
3.3.	Considerações Finais.....	54
CAPÍTULO 4.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	55
4.1.	Introdução.....	55
4.2.	Crterios de Otimização.....	56
4.2.1.	Perdas de Potência Ativa.....	56
4.2.2.	Violações dos Limites de Tensão	58
4.2.3.	Custo das Violações das Quedas de Tensão	59
4.2.4.	Custo de Conexão	59
4.3.	Programação Multiobjetivo	60
4.4.	Fluxo de Potência	64
4.4.1.	Fluxo de Potência Ótimo – FPO	64
4.4.2.	Restrições de Igualdade	65
4.4.3.	Restrições de Desigualdade.....	65
4.5.	Análise de Sensibilidade para Restringir Campo de Busca	67
4.6.	Codificação dos Indivíduos.....	69
4.7.	Memória.....	71
4.8.	Parâmetros dos AG	71

4.9.	Validação da Metodologia de Alocação.....	72
4.10.	Considerações Finais.....	73
CAPÍTULO 5.	RESULTADOS	74
5.1.	Análise de sensibilidade para redução do campo de busca.....	76
5.2.	Simulações do Sistema	80
5.3.	Considerações finais	93
CAPÍTULO 6.	CONCLUSÕES	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características associadas ao tipo de material aplicado	36
Tabela 4.1 - Número de Horas para cada condição de Carga para dia útil (DU).....	57
Tabela 4.2 – Regras para obtenção das violações dos limites de tensão	58
Tabela 4.3 – Tensão na barra inicial para cada condição de carga.....	59
Tabela 4.4 – Exemplo de decodificação de um indivíduo.....	70
Tabela 4.5 – Configuração dos AG	72
Tabela 5.1 - Valores dos conjuntos de candidatas em ordem crescente.....	77
Tabela 5.2 – Comparação de perdas alocando fora do conjunto candidatas	78
Tabela 5.3 – Comparação valores das tensões caso original e conjuntos simulados (valores em pu)	78
Tabela 5.4 – Comparativo entre os fluxos das simulações com e sem GD (pu).....	79
Tabela 5.5 – Custos comparados para os sistemas sem e com GD	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia de <i>Smart Grid</i> associado a um consumidor típico (www.automatedbuildings.com/news)	13
Figura 2-Diagrama Esquemático de uma Microturbina. (BORBELY e KREIDER, 2001)	25
Figura 3 – Detalhes da Microturbina Capstone C30 (30kW) – Lab. LH2 – Unicamp.....	27
Figura 4 – Modelo de Célula Alcalina (<i>Alkaline Fuel Cell</i> – AFC) fonte(IEAv).....	29
Figura 5 – Modelo de Cac a Ácido Fosfórico (PAFC) fonte(IEAv)	29
Figura 6 – Unidade DFC 300 instalada no LADWP (www.energy.ca.gov)	30
Figura 7 – Modelo de Cac a Óxido Sólido (SOFC) Fonte (IPEN)	31
Figura 8 – Esquema interno da unidade SOFC <i>Siemens-Westinghouse</i> 100kW (www.scielo.br).....	32
Figura 9 – Vista externa da unidade SOFC <i>Siemens-Westinghouse</i> 100kW (www.scielo.br).....	32
Figura 10 – Estrutura típica de uma célula fotovoltaica em camadas típicas (Willis, 2000)	34
Figura 11 - Central Solar Fotovoltaica de Amareleja – Portugal (energiasrenovaveis.files.wordpress.com).....	34
Figura 12 – <i>International Space Station</i> – ISS (NASA)	35
Figura 13 – Gráfico do comportamento da corrente em função da tensão em nível DC	38
Figura 14 – Gráfico do comportamento da potencia em relação à tensão em nível DC	38
Figura 15 – Efeitos sobre as perdas do sistema devido à alocação ótima e dimensionamento de GD (Acharya,N., 2006)	43
Figura 16 – Representação de Cromossomo de Genes Binários	46
Figura 17 – Fluxograma de funcionamento de um AG (SZUVOVIVSKI, 2008)	48
Figura 18 – Simbologia do Método da Roleta	50
Figura 19 – Simbologia do Método da Amostragem Universal Estocástica	51
Figura 20 – Simbologia para o Cruzamento em 1 ponto.....	52
Figura 21 – Simbologia para o Cruzamento em 2 pontos	53
Figura 22 – Simbologia para o Cruzamento Disperso	53
Figura 23 – Simbologia para o Cruzamento Uniforme.....	53
Figura 24 – Simbologia para Mutação, representando apenas os genes modificados	54
Figura 25 – Decodificação da Barra para uma GD	69
Figura 26 – Exemplo de decodificação de um indivíduo.....	70
Figura 27 – Sistema de 70 barras (Baran e Wu, 1989)	76
Figura 28 – Gráfico das tensões nas barras para o patamar leve, em pu	81
Figura 29 – Gráfico das tensões nas barras para o patamar pesado, em pu	82
Figura 30 – Fluxos nas linhas do sistema em pu, patamar leve.....	83
Figura 31 - Fluxos nas linhas do sistema em pu, patamar pesado	83
Figura 32 – Quedas de tensão porcentual do sistema de 70 barras, patamar leve	85
Figura 33 - Quedas de tensão porcentual do sistema de 70 barras, patamar pesado	85
Figura 34 – Sistema 70 barras com alocação de GDs.....	87
Figura 35 – Tensões patamar leve, considerando alto custo de conexão	89
Figura 36 - Tensões patamar pesado, considerando alto custo de conexão	89
Figura 37 – Fluxos nas linhas do sistema em teste, patamar leve, custo conexão alto	90
Figura 38 – Fluxos nas linhas do sistema em teste, patamar pesado, custo conexão alto	91
Figura 39 – Quedas de tensão no sistema, patamar leve, custo de conexão elevado	92
Figura 40 – Quedas de tensão no sistema, patamar pesado, custo de conexão elevado	92

RESUMO

Uma das alternativas encontradas, atualmente, para redução de custos na produção de bens e serviços no setor elétrico é a aplicação de geradores de energia elétrica de porte reduzido, movidos a combustíveis fósseis ou não, para suprir o consumo local e, no caso de sobras, vender para o Sistema Interligado. Este tipo de tecnologia está englobada na chamada Geração Distribuída (GD).

Apesar das flexibilidades inerentes das GDs, as conexões das mesmas na rede de distribuição provocam impactos que exigem cuidados para escolha do melhor ponto de conexão da mesma com a rede. Ou seja, devem-se realizar estudos a fim de se definir qual o melhor ponto de conexão da GD na Rede de Distribuição ao qual ela será ligada, de modo a trazer benefícios para o sistema como um todo, tais como: diminuição de perdas, de violações no perfil de tensão e de sobrecarga nas linhas.

O objetivo desse trabalho é então a solução dessa questão que envolve um problema de otimização que foi resolvido pela técnica dos Algoritmos Genéticos aliada a um Fluxo de Potência Ótimo, a fim de contornar problemas de condicionamento numérico de redes radiais extensas. Os resultados da metodologia foram apresentados utilizando uma rede de distribuição, puramente radial de 70 barras.

ABSTRACT

One of the alternatives found to reduce costs in the production of goods and services in the Power System is the application of generators, moved or not by fossil fuels, to supply the local consumption and, in case of energy surplus, sell to the Interconnected Power System. This kind of technology is called by Dispersed or Distributed Generation (DG).

Despite of the DGs inherent flexibility, the point of connection must be carefully chosen in order to avoid any hazardous impact. Thus, some studies must be carried out to choose the best DG connection point of the GD in the Distribution System. This represents low losses, acceptable voltage levels and less overloaded distribution lines.

The main purpose of this work is the solution of an optimization problem solved by Genetic Algorithm together with an Optimal Power Flow, in order to control any kind of numeric problems existing in large radial Distribution Systems. Results obtained for a 70 bars system was presented in this work.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

No mundo todo, ocorre uma grande demanda por energia para sustentar o crescimento das mais diversas áreas da economia, existindo, assim, um grande número de indústrias e empresas, consumidoras de energia, que buscam alternativas para redução de custos na produção de bens e serviços.

Uma das alternativas encontradas é a aplicação de geradores, movidos a combustíveis fósseis ou não, para suprir o consumo local e, no caso de sobras, vender para o Sistema Interligado. Este tipo de tecnologia está englobado na chamada Geração Distribuída que, inclui geradores baseados em biomassa, turbinas de combustão, sistemas de concentração da energia solar e fotovoltaica, células a combustível, microturbinas, conjuntos motores/geradores, tecnologias de armazenamento, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e turbinas eólicas.

Este tipo de produção, também conhecido como Geração Dispersa (GD), tem este nome devido a sua localização mais próxima às cargas, muitas vezes conectadas diretamente a clientes ou subestações de distribuição.

Várias razões se destacam para a crescente utilização de GDs nos sistemas mundiais:

- equipamentos com potências disponíveis variadas, permitindo atender desde pequenos consumidores com unidades simples até grandes grupos consumidores através de agrupamento de geradores formando “pequenas usinas” próximas à carga;
- aproveitamento de combustíveis disponíveis próximos aos centros de carga como o GN (gás natural), hidrogênio (H₂), Álcool (etanol) e etc.;
- custos de geração e transporte de energia elétrica competitivos, apresentando alternativas que os reduzem ao mesmo tempo em que se mantém o atendimento aos consumidores finais dentro dos melhores patamares aceitos e permitidos pelas agências reguladoras.

No entanto, apesar dos atrativos que impulsionam grandes esforços mundiais em estudo e implementação desses sistemas alternativos de geração de energia elétrica, ainda se vive um período de grande aprendizado quanto a este tipo de geração e quanto ao impacto da conexão dos mesmos às redes de distribuição de energia.

Existem dificuldades como legislação inadequada, ou seja, falta de procedimentos comerciais que garantam aos produtores um retorno financeiro adequado dos investimentos realizados, falta de normas adequadas que prevejam a possibilidade de acesso do gerador ao sistema de distribuição da concessionária, além de um conhecimento aprofundado das características deste tipo de tecnologia.

Essas dificuldades foram exacerbadas pela reestruturação do setor elétrico que provocou um dinamismo na consideração de GDs devido ao número de participantes da indústria de energia, tanto compradores como vendedores, que passaram a ser mais responsáveis pela força de mercado.

1.1. Justificativa

De acordo com Brown, (2008), o sistema de distribuição do futuro será bastante ramificado e inteligente, diferentemente do atual, altamente radial e sem comunicação entre os elementos do sistema. A este sistema inteligente e futurista dá-se o nome de *Smart Grid*.

Em um relatório feito pela *Northwest* (2005), intitulado “*Powering up the Smart Grid*”, a *Smart Energy* é definida como a aplicação de tecnologia de informação digital visando a otimização de geração de energia elétrica, bem como seu transporte e uso final.

Atualmente o conceito de *Smart Grids* tem se difundido em todo o mundo e as tecnologias que surgem dentro deste panorama visam a um sistema muito mais interligado uma vez que, as atuais cargas do sistema podem vir a se tornar

geradores, a partir do uso de tecnologias de geração por fontes alternativas de energia.

Ao considerar esta possibilidade percebe-se que as empresas de energia devem estar preparadas para o novo tipo de configuração de carga. A Figura 1 apresenta a topologia de uma instalação onde o conceito de *Smart Grid* está aplicado.

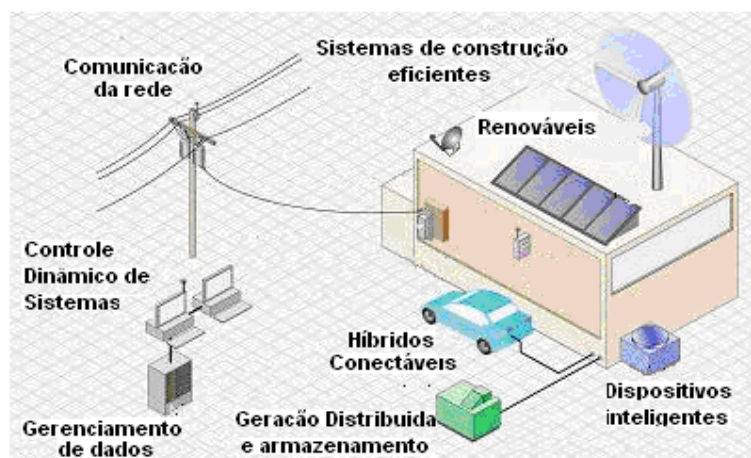


Figura 1 – Topologia de *Smart Grid* associado a um consumidor típico
(www.automatedbuildings.com/news)

Como o conhecimento acerca das tecnologias de GD que compõem os *Smart Grids* é ainda muito restrito, ou seja, nem todas as concessionárias dispõem de estudos sobre o tema ou quando dispõem, são apenas sobre determinadas tecnologias sem considerar os efeitos de sua alocação prática no sistema, vislumbrou-se a necessidade de se aprofundar estudos nessa área, principalmente no que tange aos problemas de escolha de melhores pontos de conexão das GDs à rede de distribuição e à escolha dos melhores montantes de potência a serem instalados.

Assim, este trabalho visa desenvolver uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos (GA) que dimensiona e aloca os pontos de conexão de tais tecnologias ao sistema de distribuição. A avaliação de cada solução apresentada pelos AGs, ou seja, a solução do fluxo de carga associado a cada inserção das GDs

é feita através de um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) simplificado, resolvido pelo Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual.

Além do mais, a solução desse problema despende um alto custo computacional, pois envolve um grande campo de busca. Assim, também se pretende apresentar estudos que elejam como candidatos prioritários, alguns pontos da rede de distribuição mais favoráveis à conexão da GD que solicita acesso ao sistema.

1.2. Motivação

Como esse novo modelo de GDs conectadas diretamente a Redes de Distribuição engloba conceitos inovadores de planejamento, operação e ajustes de proteção, a maioria das empresas devem se adaptar a esta nova realidade.

Dentre as frentes de estudo, que esse trabalho se concentra, salientam-se as relacionadas ao controle das perdas elétricas e manutenção do perfil de tensão e quedas de tensão dentro de limites estabelecidos pelas leis vigentes.

Assim, a grande motivação desse trabalho é a de se desenvolver um algoritmo de otimização capaz de dar suporte ao planejador de Redes de Distribuição quanto às tomadas de decisão referente ao ponto ideal de conexão de uma tecnologia previamente determinada. Essa escolha está baseada na minimização das perdas elétricas e na melhoria do perfil de tensão, além dos benefícios quanto à redução de fluxo de potência nas linhas. Como o horizonte de estudo é de um ano, considerando-se carga pesada e leve, optou-se por se escolher também qual o montante de geração a ser gerado pela GD dentro de faixas pré-estabelecidas.

1.3. Objetivos

Para se atingir o objetivo geral que é a obtenção do melhor ponto de conexão de GDs às Redes de Distribuição, seguiu-se as seguintes etapas:

- revisão bibliográfica acerca do estado da arte sobre Geração Distribuída (GD);
- estudo conceitual sobre Algoritmos Genéticos (AG), que é técnica de inteligência artificial (IA) a ser utilizada neste trabalho;
- análise de sensibilidade para diminuição de campo de busca do problema de otimização;
- desenvolvimento de metodologia para alocação ótima de GDs;
- testes e validação do algoritmo desenvolvido.

1.4. Organização da Dissertação

No capítulo introdutório, descreve-se o problema a ser abordado, bem como a metodologia a ser utilizada para sua solução. Em seguida, no capítulo 2, apresenta-se um levantamento bibliográfico ou estado da arte sobre o que já foi publicado acerca do tema proposto e no capítulo 3, apresenta-se detalhes sobre os AGs e sua aplicação na solução do problema.

Já no capítulo 4, é formulada a metodologia aplicada na solução do problema proposto, descrevendo-se a formulação matemática e a análise de sensibilidade que objetiva a escolha do conjunto de barras candidatas à alocação de unidades de GD.

Finalmente, tem-se a apresentação de resultados e as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentados os resultados de levantamento bibliográfico, realizado acerca do tema Geração Distribuída (GD) e suas implicações e aplicações no sistema de distribuição.

Também se buscou obter o maior número de publicações que, como proposto neste trabalho, fizessem uso de inteligência artificial, associado ao uso de fluxo de potência, para alocação de unidades de GD, vislumbrando detectar benefícios e malefícios quando da utilização deste tipo de tecnologia.

2.1. Levantamento Bibliográfico

O tema Geração Distribuída tem tomado grande vulto em todo o mundo, dado a solicitação da carga por novas fontes de energia que apresentem boa qualidade de fornecimento e custo acessível. Um levantamento sobre as literaturas que discursam sobre o tema foi realizado, conforme se pode verificar ao longo deste capítulo.

Silva (2002) chama a atenção para a grande diversidade de termos utilizados na atualidade como, por exemplo, co-geração e produção independente; geração distribuída, fontes renováveis de energia e fontes alternativas de energia que provocam discussões, muitas vezes errôneas acerca desses temas. Assim, o estabelecimento de alguns conceitos se faz necessário.

- Fontes Alternativas de Energia – Fontes de energia, relativamente novas, não utilizadas tradicionalmente e que não produzem energia em grande escala, tais como solar, eólica, células a combustível, biomassa, etc.
- Fontes Renováveis de Energia – não utilizam a queima de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica. Como exemplo, tem-se a energia solar e eólica.

- Co-geração – produção simultânea a partir de uma única fonte de energia primária, de energia mecânica e de calor. A energia mecânica é convertida em elétrica, enquanto o calor é aproveitado para climatização de ambientes, por exemplo.

Alguns autores, como Borbely (2000), consideram Geração Distribuída (GD), geradores de pequena escala, gerando energia próxima à carga e que, em princípio, atende uma geração de até 10 MW, localizada estrategicamente.

Em Chiradeja e Ramakumar (2005) os limites para GDs estão classificados entre 5 kW e 100 MW. Já em Willis e Scott, (2000), a faixa de potência para geradores tipicamente considerados como GDs varia entre 15 kW e 10 MW. Já a localização da GD pode ser tanto na planta da concessionária, diretamente conectada ao cliente acessante da rede ou ilhado.

Muitos autores também têm publicado estudos sobre os impactos elétricos das GD nas redes elétricas e sobre como planejar a inserção das mesmas de modo a otimizá-los. Assim, na sequência serão descritos alguns trabalhos nessa linha e que nortearam o desenvolvimento dessa dissertação.

Chiradeja e Ramakumar (2004) propuseram uma abordagem geral e um conjunto de índices para descrever alguns benefícios técnicos obtidos pelas GD de maneira quantitativa. Os índices propostos são: 1) índice de melhoria de perfil de tensão; 2) índice de redução de perdas; 3) índice de redução de impacto ambiental; 4) índice de benefícios da GD. Para um sistema 12 barras analisado, todos os índices obtiveram resultados satisfatórios para diferentes alocações de GDs na rede.

Avaliar a metodologia para determinação do impacto da alocação de GD nas perdas elétricas, confiabilidade e perfil de tensão de sistemas de distribuição foi o proposto em Borges e Falcão (2003). As perdas e o perfil de tensão foram avaliados através de fluxos de potências com a representação dos geradores como barras PV. Esta metodologia foi usada para avaliar a influência do local da instalação e a

capacidade da GD nas características de desempenho do sistema para diferentes alternativas de planejamento de expansão.

Alguns autores como Acharya, Mahat e Mithulananthan (2006) apresentam uma metodologia para calcular o tamanho ótimo da unidade de GD minimizando as perdas no sistema de distribuição primário. O efeito do tamanho e do local para a GD com respeito às perdas na rede também foi examinado em detalhes. A metodologia proposta foi testada e validada em três sistemas de testes de distribuição com variação de tamanho e complexidade. Os resultados obtidos a partir da metodologia proposta são comparados com exaustivos fluxos de potência associados ao método da sensibilidade das perdas.

Khoa, Binh e Tran (2006) apresentaram uma metodologia que despacha GD em todos os possíveis pontos de conexão. A escolha final da dimensão e local se dá escolhendo-se os pontos com os maiores valores despachados. O problema de otimização envolvido nesse trabalho se relaciona à minimização das perdas e o mesmo foi resolvido pelo Método dos Pontos Interiores para um sistema de apenas 10 barras.

Do ponto de vista da aplicação de inteligência artificial, têm-se algumas publicações cuja metodologia utiliza este tipo de recurso, como a seguir relatadas.

Gandomkar, Vakilian e Ehsan (2005) propõem que a solução exata para a alocação de GD pode ser obtida a partir de uma completa enumeração de todas as combinações possíveis de localização e tamanho das GDs. Tal proposição é interessante quando se avalia sistemas cujo tamanho é reduzido. Um sistema de dimensões maiores pode conduzir a tempos elevados, caso se deseje avaliar todas as combinações.

A fim de superar dificuldades existentes na utilização de Algoritmos Genéticos tradicionais, tais como as perdas na taxa de diversidade para escolha da sequência genética dos pais, aplicou o Algoritmo Hereford Hanch que utiliza diferenciação sexual entre os reprodutores selecionados de um conjunto de parentes pela seleção genética. O sistema de distribuição testado neste estudo foi o de 34 barras do IEEE.

Muitos exemplos foram resolvidos com objetivo de testar a metodologia proposta, e os resultados apresentaram melhoria de qualidade das soluções na ordem de 11% quando comparados com os resultados dos Algoritmos Genéticos clássicos.

Carpinelli et al. (2001) propuseram um procedimento baseado em Algoritmos Genéticos (AGs) e na Teoria de Decisão, tendo por objetivo estabelecer a melhor localização e potência de uma unidade de GD em sistemas de média tensão, considerando os limites técnicos do sistema tais como: limite de capacidade de transmissão do alimentador, perfil de tensão e correntes de curto-circuito nos diversos pontos do alimentador. A tecnologia analisada foi baseada em energia eólica, produzida em fazendas de aerogeradores. A função objetivo visou determinar a melhor maneira de estruturar a rede de modo a atender a carga ao mínimo custo.

Para tal estudo foi considerada uma determinada área de média tensão do sistema italiano e o período avaliado foi de 20 anos, com uma taxa de crescimento de demanda anual da ordem de 3%. A partir do estudo realizado foram determinadas reduções consideráveis nas perdas e conseqüente redução dos custos globais.

Cano (2007) analisa o problema da alocação ótima de GD utilizando otimização Nebulosa Multiobjetivo. O objetivo desta aplicação visou à redução de variação de tensão, da capacidade de curto-circuito, do custo de operação e de perdas do sistema. Neste estudo foi observado que os resultados, quando comparados a outros métodos analíticos são bem aproximados. Isso demonstra que a otimização nebulosa apresenta técnicas e considerações econômicas muitas vezes negligenciadas em outros estudos.

De modo geral, os trabalhos descritos acima, concentram-se no dimensionamento das GDs, visto sob a ótica do sistema, ou melhor, supondo que é a concessionária de distribuição que pretende instalar e operar as GD. No entanto, os problemas que as concessionárias vêm enfrentando são pedidos de conexão de GDs, cujas tecnologias já foram dimensionadas pelo proprietário. Ou seja, cabe às distribuidoras levantar questões técnicas quanto ao melhor ponto de conexão das mesmas (as quais já foram dimensionadas e instaladas) na rede, de modo a induzir

a diminuição das perdas elétricas, melhorando o perfil de tensão do alimentador, reduzindo a sobrecarga nos cabos dos alimentadores, dentre outros.

Nenhum dos trabalhos citados anteriormente aborda o problema sob essa ótica, assim o objetivo principal deste trabalho é encontrar pontos ideais de conexão de tecnologias já especificadas, utilizando a experiência de trabalhos afins, que resolvem seus problemas sistêmicos com as técnicas dos Algoritmos Genéticos.

Para análise da inserção das GDs, é necessário resolver as equações de balanço de potência ativa e reativa considerando a nova configuração, a fim de avaliar o desempenho da rede em relação às perdas, perfil de tensão e sobrecarga nas linhas. Ou seja, é preciso resolver um problema de FP.

Vários métodos eficientes para solução do problema de FP em redes de distribuição radiais estão disponíveis na literatura especializada (SRINIVAS, 2000). Basicamente estes métodos se dividem em dois grandes grupos: método da soma das correntes (SDC) ou soma das potências (SDP), também conhecidos como métodos de “varredura direta e reversa”, e os métodos baseados na “Impedância Nodal Implícita”. No entanto tais métodos são aplicáveis a sistemas radiais puros, ou seja, só são aplicados quando não há nenhuma malha fechada no alimentador em estudo.

Além disso, conforme o porte da GD inserida no alimentador pode haver necessidade de se controlar a tensão da barra na qual ela está conectada e, para tanto, há necessidade de se ajustar o valor de potência reativa a ser gerada. Esse controle de tensão e potência reativa não pode ser realizado com os métodos de varredura.

Recentemente, CARVALHO (2006), PAIVA (2006) e SZUVOVIVSKI (2008) aplicaram o Método de Pontos Interiores versão Primal-Dual para resolução das equações de balanço de potência ativa e reativa de redes de distribuição. Para resolvê-las, foi formulado um problema de otimização tal como um FPO, mas com várias simplificações, por exemplo, ausência de restrições de tensão, ausência de

controle de fluxo nas linhas e outros. Os resultados apresentados para redes radiais foram satisfatórios.

O FPO foi proposto primordialmente por Carpentier (1962), a partir do problema de despacho econômico (DE). Torres e Quintana (1998) discutiram a importância dessa ferramenta para os trabalhos de planejamento e operação de sistemas de potência e desde então tem sido bastante estudado.

Quanto aos métodos usuais de FP utilizados em sistema de transmissão, Monticelli (1983) descreve o Método de Newton-Raphson e seus variantes: Método Desacoplado e Desacoplado Rápido. Estes não apresentam desempenho adequado no caso de redes de distribuição radiais devido a problemas de dominância e mau condicionamento da matriz de admitância nodal. Esse fato resulta de características particulares das redes de distribuição tais como a baixa relação X/R (reatância/resistência) dos parâmetros dos alimentadores, trechos com impedâncias relativamente baixas (representação de chaves, RT e trechos pequenos de linha entre cargas muito próximas) associados a outros com valor de impedância relativamente alto.

Outra questão a ser abordado nesse trabalho diz respeito a estudos de sensibilidade que têm por intuito diminuir o campo de busca do problema. Para sistemas reais, a obtenção do ponto mais adequado de conexão de GD pode depender um alto custo computacional. Assim, são necessários estudos prévios que elejam como candidatos prioritários, alguns pontos da rede de distribuição mais favoráveis à conexão da GD que solicita acesso ao sistema.

Existe pouca literatura para esse tipo de estudo, por exemplo, Acharya, Mahat e Mitulananthan (2006) estabeleceram um método baseado no fator de sensibilidade de perdas em relação à injeção de potência ativa. A partir da equação de perda real de potência nos sistemas de distribuição, P_L , calculou-se a relação entre as perdas ativas e a potência real injetada no sistema pela GD ($\partial P_L / \partial P$). Esse fator de sensibilidade foi calculado para cada barra do sistema utilizando inicialmente os valores obtidos no caso base do fluxo de potência. Os maiores valores de

sensibilidade representam as melhores candidatas do sistema em estudo para alocação da GD.

Como esse trabalho foca principalmente a minimização das perdas, pois é um dos quesitos mais impactantes em termos de custo para a rede de distribuição, e inspirando-se no trabalho citado anteriormente, buscaram-se outras maneiras de se diagnosticar conjuntos de barras candidatas à alocação de GD, tais como: (i) através da análise dos multiplicadores de Lagrange (SOUZA, 2003) relacionados ao problema de otimização; (ii) através da análise das Perdas Incrementais, obtidas de um fluxo de carga convergido tal qual Rodrigues (2007) e Acharya, Mahat e Mitulananthan (2006) e; (iii) através da análise do despacho de GDs alocadas sobre todo o espectro de possibilidades da rede de distribuição, Khoa, Binh e Tran (2006).

2.2. Tecnologias em Geração Distribuída

Conforme Silva (2002), as energias distribuídas representarão um total de 20% da capacidade nova de geração, ou seja, cerca de 35 GW nas próximas duas décadas. Já o Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (EPRI) estima que o mercado de GD possa acrescentar cerca de 2,5 a 5 GW por ano até 2010. Tal acréscimo ainda é bastante elevado para os padrões atuais, no entanto o apoio de governos tem permitido que diversos empreendimentos sejam executados em todo o mundo.

Diversas tecnologias têm sido aplicadas, dentre as quais se destacam:

- Microturbinas a Gás;
- Geradores Eólicos;
- Células a Combustível;
- Painéis Fotovoltaicos;
- PCHs;

Outros tipos de geração como aquelas obtidas a partir da conversão térmica solar, Motores *Stirling*, e conversores de biomassa também são considerados GDs.

Todas as tecnologias acima possuem particularidades que devem ser atendidas para que seu uso otimizado possa proporcionar os resultados esperados por clientes e fornecedores. Uma combinação bem feita entre logística e estratégia de proteção são fatores preponderantes para a determinação do tipo de tecnologia e ponto de conexão ideal para cada caso.

As unidades de geração distribuída, por apresentarem uma característica modular, ou seja, por serem compactas e de fácil mobilização são altamente aplicáveis para diversas situações. Além disso, seu modo de operação pode ser feito nas seguintes condições:

- Potência *Stand by*: equipamento permanece à disposição da carga para suprimento em caso de faltas ou necessidades específicas;
- Geração na Ponta: programa-se o equipamento para gerar apenas nos picos de carga;
- Geração na base: gera energia constante na base, durante todo ou parte do período de trabalho visando redução de custos com energia contratada;
- Co-geração: talvez a maneira mais interessante de utilizar as GDs disponíveis no mercado atualmente. A grande quantidade de energia térmica dissipada pode ser aproveitada para produção de vapor tanto para geração de energia quanto para o aproveitamento de calor para aquecimento de água, por exemplo.

Um dos objetivos da utilização da GD é associar a aplicação de tecnologias eficientes, que atendam às necessidades da carga, mas que também devem ter a proposta de ser o menos agressiva possível ao meio ambiente.

Quanto à operação, devem, prioritariamente, estar em consonância com a rede, mantendo a mesma frequência e promovendo até, em alguns casos, a melhora do perfil de tensão do alimentador e proporcionar a redução de perdas no sistema.

Borbely e Kreider (2001) apresentam de modo bastante didático algumas das características mais importantes das GDs em aplicação no mundo. Atualmente,

muitas das tecnologias citadas nesse livro já sofreram grande evolução, principalmente no que se refere à eficiência e modularidade.

Os avanços da eletrônica permitem que estas tecnologias possam aumentar sua capacidade de geração efetiva, além de, em alguns casos, reduzirem de tamanho consideravelmente.

A seguir estão descritas algumas das tecnologias em uso no panorama mundial.

2.2.1. Microturbina (MT)

Trata-se de uma turbina de combustão que inclui um compressor, um recuperador, um combustor, uma turbina e um gerador. As partes rotativas estão montadas em um eixo simples suportado por rolamentos de ar com rotação máxima de 96.000 rpm. O gerador de ímã permanente é resfriado por um fluxo de ar para o interior da microturbina. A saída do gerador tem tensão e frequência variáveis em corrente alternada (CA). O gerador é usado como um motor durante a partida e durante os ciclos de parada (resfriamento da microturbina). A Figura 2 ilustra as partes componentes de um MT.

(i) Controlador

O controlador digital de potência controla a operação da microturbina e todos os subsistemas. O controlador desempenha as funções de conversão de potência, convertendo a tensão em frequência variável do gerador em tensão CC e então para corrente em frequência constante ou tensão CC variável.

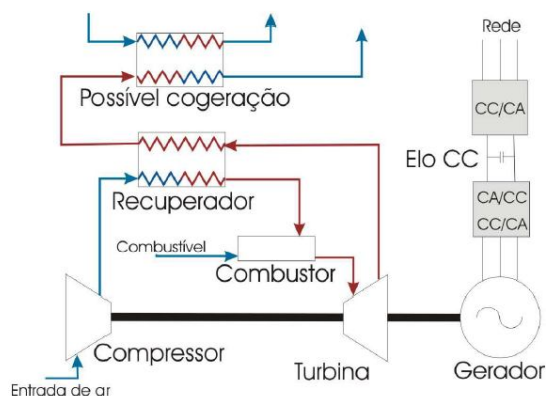


Figura 2-Diagrama Esquemático de uma Microturbina. (BORBELY e KREIDER, 2001)

Durante a partida, o controlador opera como um inversor de frequência e motoriza o gerador até que a potência esteja disponível a partir da microturbina. O controlador opera novamente como um inversor de frequência durante o resfriamento para dissipar o calor armazenado no recuperador e na estrutura a fim de proteger os vários componentes da microturbina.

(ii) Sistemas de combustível

A microturbina inclui um sistema integral de controle de entrada de combustível. O sistema padrão é projetado para combustíveis baseados em hidrocarbonetos gasosos pressurizados. Outros modelos estão disponíveis para combustíveis gasosos de baixa pressão, combustíveis gasosos com baixo poder calorífico, com componentes corrosivos e combustíveis líquidos.

Valores nominais de pressão do gás:

- Alta pressão
- Pressão combustível: 359 – 379 kPa
- Fluxo combustível: 840 MJ/h.
- Poder calorífico combustível: 26.000 kJ/m³ – 95.000 kJ/m³.
- Até 7% H₂S em volume.
- Baixa pressão
- Pressão combustível: 34 – 103 kPa (5 a 15 psig)
- Fluxo combustível: 840 MJ/h.
- Poder calorífico combustível: 36.000 kJ/m³ – 43.000 kJ/m³.

(iii) Modos de operação da microturbina

- Modo Conectado à Rede (*Grid-connected mode*)

A microturbina quando conectada à rede é ligada em paralelo e fornece energia elétrica para cargas também conectadas. A energia elétrica gerada por ela somente é fornecida a essas cargas quando a rede da concessionária está presente.

Durante as interrupções do fornecimento pela concessionária no ponto onde a microturbina esteja conectada, esta detecta a interrupção e imediatamente se desconecta da rede. Quando há o retorno do fornecimento, a microturbina pode reiniciar automaticamente e fornecer energia para as cargas conectadas. No modo conectado à rede, a microturbina é somente uma fonte de corrente. Assim, tanto a frequência quanto a tensão da rede são as referências para a operação deste equipamento.

- Modo isolado da rede (*Stand-alone mode*)

Quando a microturbina opera no modo isolado da rede, cargas podem ser supridas diretamente e a microturbina é uma fonte de tensão e corrente. Um sistema com baterias fornece energia para partida e o gerenciamento de demanda transitória.

A Figura 3 apresenta a imagem de uma microturbina (*Capstone*) de 30 kW.

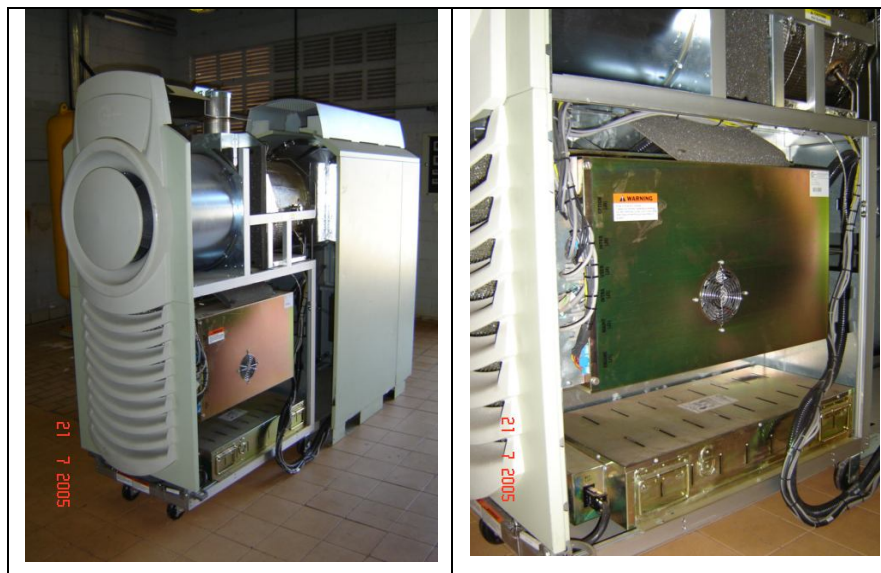


Figura 3 – Detalhes da Microturbina Capstone C30 (30kW) – Lab. LH2 – Unicamp

2.2.2. Células a Combustível (Cac)

Com mais de um século de existência as células a combustível começaram a receber maior atenção nos anos 50, quando foram escolhidas pela *NASA* como a melhor tecnologia para produzir energia a bordo da espaçonave Apollo. Este evento pode ser considerado como o marco inicial para o desenvolvimento da tecnologia de células a combustível e suas aplicações em áreas civis.

Essas primeiras células requeriam hidrogênio e oxigênio puros e utilizavam materiais caros, como eletrodos de platina. Porém, avanços tecnológicos recentes, principalmente o desenvolvimento de novos materiais condutores operando em temperaturas maiores, estão melhorando significativamente as perspectivas econômicas para as células a combustível.

Especificamente, as altas temperaturas de funcionamento permitem que as novas células trabalhem eficientemente quando alimentadas com gás natural e ar, em lugar do hidrogênio e oxigênio puros. A utilização de materiais mais baratos e a produção de calor de exaustão são suficientes para prover aquecimento de ambientes, de água, ou ainda uma geração de energia extra, também se refletem na viabilidade econômica das células. Apesar dos custos ainda serem altos, a

defasagem está diminuindo, e continuará dessa forma enquanto continue o ritmo de investimentos atual e mais e mais células sejam produzidas e instaladas.

Atualmente as células têm grande apelo ecológico visto que emitem baixos ou quase nenhum poluente, além de apresentarem alta eficiência para a produção de energia elétrica. As expectativas quanto aos baixos níveis de poluição gerados e altas eficiências foram confirmadas em todas as tecnologias em desenvolvimento. A flexibilidade quanto ao combustível de alimentação foi demonstrada utilizando gás natural, propano, gás extraído de digestores anaeróbicos, combustíveis especiais desenvolvidos para aplicações militares, gás de carvão mineral, gás de aterros sanitários, etc. Esta flexibilidade permite expandir o mercado potencial de aplicação.

As células a combustível são mais eficientes que a combustão para conversão da energia química dos hidrocarbonetos em eletricidade, permitindo que os mesmos produzam mais energia por unidade de combustível consumido.

Finalmente, pelo fato das células possuírem poucas partes móveis, elas são seguras, silenciosas e confiáveis, tornando-as uma tecnologia chave para a viabilização da tendência emergente na direção de uma utilização da energia de forma mais eficiente e inofensiva ao meio ambiente, por meio da geração distribuída (produção de energia em pequenas quantidades, próximo ao local de uso) e sistemas combinados de geração de calor e energia.

Há diversas tecnologias de Células a Combustível em desenvolvimento comercial atualmente. Elas são identificadas por seu componente mais importante: o eletrólito. É o eletrólito que determina a temperatura de operação e, portanto o catalisador a ser aplicado nos eletrodos, bem como os requisitos do processamento de gás.

A seguir são citadas algumas das diferentes tecnologias em Células a Combustível.

2.2.2.1. Células alcalinas, denominadas *Alkaline Fuel Cell – AFC*

O eletrólito utilizado por estas células a combustível é o hidróxido de potássio, retido numa matriz de asbesto. Os catalisadores da reação podem ser Ni, Ag, óxidos metálicos, metais nobres, etc. O combustível deve ser extremamente puro para evitar contaminações (neste tipo de célula CO e CO₂ são contaminantes, mesmo em pequenas quantidades, como as contidas no ar, pois formam carbonatos ao reagir com o KOH). A Figura 4 ilustra esse tipo de célula.

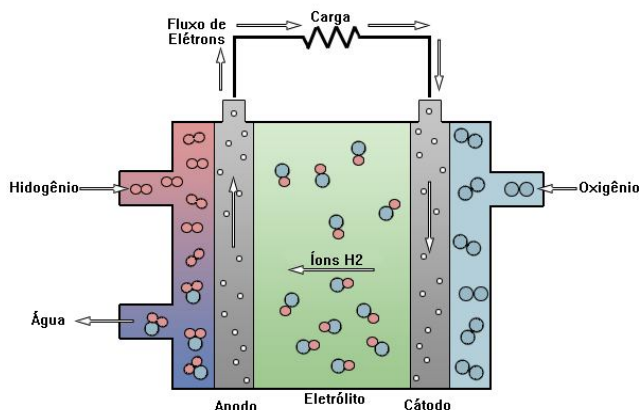


Figura 4 – Modelo de Célula Alcalina (*Alkaline Fuel Cell – AFC*) fonte(IEAv)

2.2.2.2. Células de Ácido Fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cells*)

Estas células operam a 200°C utilizando ácido fosfórico 100% concentrado. À baixa temperatura, o ácido fosfórico é um condutor muito ruim e a contaminação por CO no ânodo se torna severa. A matriz de retenção do ácido é geralmente o Carbetto de Silício, e o catalisador no ânodo e no cátodo é a platina. A Figura 5 ilustra esse tipo de célula.

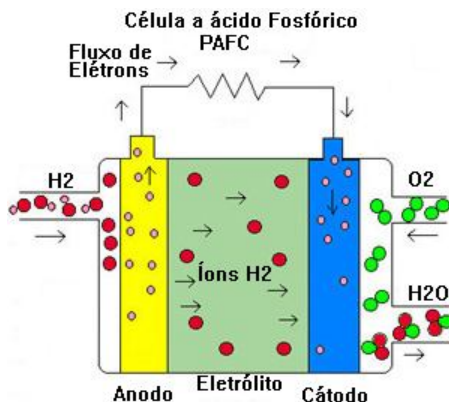


Figura 5 – Modelo de Célula de Ácido Fosfórico (PAFC) fonte(IEAv)

2.2.2.3. Células de Carbonatos Fundidos (MTFC - *Molten Carbonate Fuel Cells*)

O eletrólito neste tipo de células é geralmente uma combinação de carbonatos alcalinos retidos numa matriz de LiAlO_2 . A célula opera entre 600 e 700°C, e nesta temperatura os carbonatos formam sais fundidos altamente condutores, com o íon carbonato fornecendo a condução iônica (Figura 6). Também devido às altas temperaturas, não é necessária a adição de metais nobres como catalisadores nos eletrodos de Ni (ânodo) e óxido de Ni (cátodo).



Figura 6 – Unidade DFC 300 instalada no LADWP (www.energy.ca.gov)

As empresas fabricantes de células a combustível estão desenvolvendo unidades para geração estacionária de energia elétrica voltadas especialmente para a geração próxima da carga. Elas aproveitam características peculiares das células a combustível como modularidade, flexibilidade no uso de combustível, baixíssimos níveis de emissões e ruídos para construir unidades compactas do tipo “*plug-and-play*” e adaptadas às necessidades específicas dos clientes. Esse parece ser o padrão para a futura comercialização de unidades de célula a combustível para geração estacionária e GD.

2.2.2.4. Células de Óxido Sólido, denominadas *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC)

O eletrólito nesta célula é um óxido metálico sólido, não poroso, geralmente zircônia estabilizada com Y_2O_3 . Tipicamente o ânodo é um composto cerâmico-metalúico de zircônia, $Co-ZrO_2$ ou $Ni-ZrO_2$ e o cátodo é $LaMnO_3$ dopado com Sr.

As células a combustível SOFC (Figura 7) são as mais promissoras para a geração estacionária de energia elétrica, pois reúnem uma série de vantagens como:

- ausência de um eletrólito líquido como nas PAFC e MCFC;
- alta temperatura de operação (entre 600 e 1000°C) possibilitando dessa forma, fazer a reforma de hidrocarbonetos na própria célula;
- uso de materiais menos nobres e caros como a platina, usada como catalisador em células que operam em baixas temperaturas (AFC, SPFC, PAFC);
- grande aproveitamento do calor para co-geração e em sistemas híbridos com turbinas a gás.

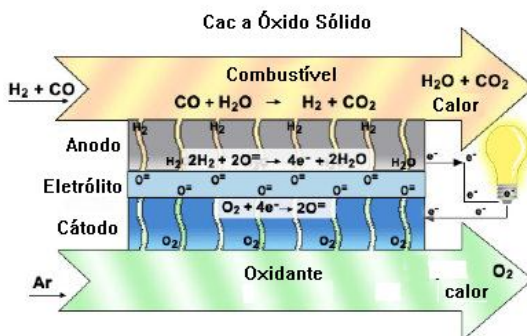


Figura 7 – Modelo de Cac a Óxido Sólido (SOFC) Fonte (IPEN)

A empresa americana *Siemens-Westinghouse* fabricou o maior sistema com célula SOFC tipo tubular (Figura 8 e Figura 9).

Dada sua fase inicial de desenvolvimento, as células SOFC ainda possuem muitos avanços a serem feitos tanto nos materiais utilizados quanto no desempenho.

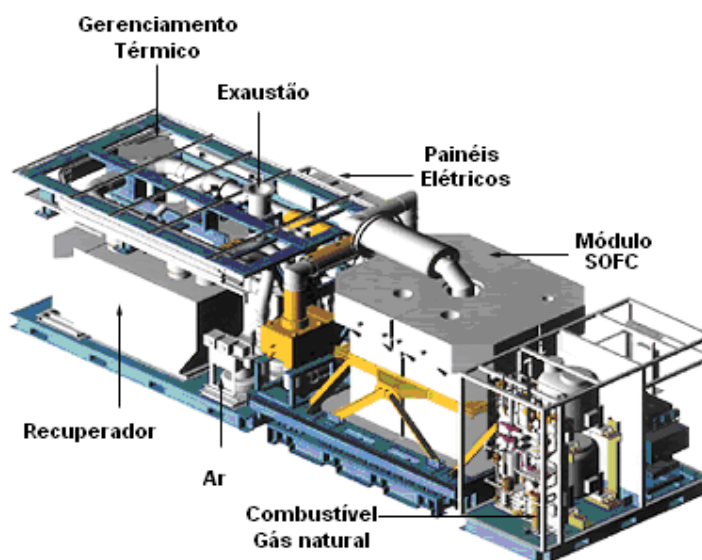


Figura 8 – Esquema interno da unidade SOFC *Siemens-Westinghouse* 100kW (www.scielo.br)



Figura 9 – Vista externa da unidade SOFC *Siemens-Westinghouse* 100kW (www.scielo.br)

2.2.3. Painel Fotovoltaico (PV)

De acordo com Willis e Scott (2000), a geração fotovoltaica se obtém da conversão da energia luminosa do sol em energia elétrica. Para tanto se utilizam alguns tipos de células solares fabricadas basicamente de silício semicondutor, composto por diodos de junções P-N espalhados sobre uma superfície cujo tamanho

é importante. Quanto maior a área exposta à radiação solar, maior a capacidade de conversão do painel.

As células fotovoltaicas produzem energia elétrica em baixa tensão e em nível DC, aproximadamente 0,5V, quando submetido à luminosidade suficiente.

Uma única célula pode ser menor que $1,0 \text{ cm}^2$ e produzir apenas uma pequena quantia de energia, muito abaixo de 1,0 (um) watt. Usualmente as células são conectadas em série para prover tensões maiores e, em paralelo para prover correntes maiores, o que pode ser chamado de vetor fotovoltaico.

A geração fotovoltaica consiste de uma tecnologia amplamente utilizada no mundo. Existem cerca de 200 milhões ou mais de painéis em uso em diversos países e em diversas aplicações. Sua maior incidência é em pequenos equipamentos como calculadoras dentre outros, todos operando em nível DC.

Assim como as células a combustível a saída DC do PV pode ser convertida em AC através de inversores e filtros, caso seja necessário conectá-los à rede ou utilizá-los em aplicações AC. No caso de aplicação de pequenas plantas fotovoltaicas o custo deste equipamento de conversão representa um montante significativo.

As células fotovoltaicas são semicondutores de junção P-N com grande área a ser submetida à radiação solar. A Figura 10 demonstra a construção do painel, desde sua proteção até os elementos que a compõem.

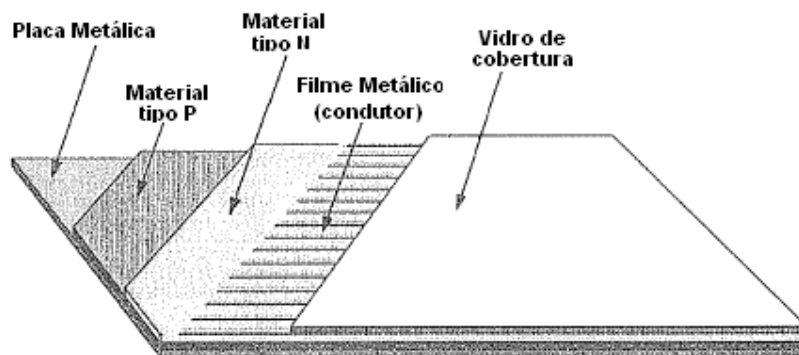


Figura 10 – Estrutura típica de uma célula fotovoltaica em camadas típicas (Willis, 2000)

A placa metálica de baixo e o vidro de proteção tem a função de aumentar a resistência do equipamento aos eventos meteorológicos e outros eventos naturais. A parte “ativa” do elemento são os níveis semicondutores dopados N e P, assim como o filme metálico ou tela metálica necessária para coletar a corrente no lado negativo da junção. Frequentemente, uma camada reflexiva é colocada no interior do conjunto para que a luz captada permaneça retida no interior do sistema para um maior aproveitamento desta energia.

O maior exemplo de aplicação de painéis fotovoltaicos no mundo está em *Concelho de Moura*, Portugal. A central solar fotovoltaica de Amareleja (Figura 11) com capacidade de 46,41 MW está sendo construída em terreno com 250 hectares.



Figura 11 - Central Solar Fotovoltaica de Amareleja – Portugal
(energiasrenovaveis.files.wordpress.com)

Além da aplicação em pequenas unidades, como por exemplo, em calculadoras, as células fotovoltaicas também são utilizadas em grandes aplicações como é o caso da ISS (Estação Espacial Internacional), Figura 12.



Figura 12 – *International Space Station* – ISS (NASA)

As células são responsáveis pelo suprimento de energia entre 130 e 180 V para a estação e esta faz a regulação para o fornecimento normalizado de 124 V.

Ainda em Willis e Scott, (2000), descreve-se que a composição de algumas células é:

- Célula fotovoltaica Cristalina espessa e poli-cristalina;
- Células fotovoltaicas de silício amorfo e de filme delgado;

A primeira é a mais tradicional forma de uso deste tipo de tecnologia sendo bastante aplicada em calculadoras e outras formas de baixa aplicação de tensão DC. Aqui, o silício é fabricado como para outra aplicação semicondutora e fatiado em finas camadas. Tais camadas podem ser produzidas da maneira tradicional, manipulando o cristal de maneira unitária ou através de moldes (estrutura poli-cristalina), sendo a melhor forma para aplicação para fins fotovoltaicos e com custo reduzido. Recomendável que os substratos N e P e a camada de metal condutor sejam acomodadas da maneira típica de fabricação de semicondutores.

A segunda representa a maneira de fabricação dos painéis industriais, através do depósito de vapor de silício amorfo. O silício é depositado como vapor sobre uma

fina chapa de metal (usualmente inox), sob condições de temperatura e pressão controlada de modo que não se cristalice, porém forme cristais amorfos com dimensões da ordem de μm . Muitos outros tipos de materiais semicondutores (Arsenato de Gálio, por exemplo), além de silício amorfo podem trabalhar com este tipo básico de processamento e fabricação. Tais materiais são depositados sobre uma fina chapa de metal através de vapor ou pulverização.

O processo de fabricação tipo “*sandwich*” tem sido investigado para fabricação comercial de tal tecnologia. É construído a partir de rolos de alguns ou muitos materiais, prensados juntos sob temperatura e pressão até a forma de lâmina. De qualquer forma, laminação ou deposição de vapor, o resultado do processo é a fabricação de células fotovoltaicas em rolos quase intermináveis, cortados do modo que convém à sua aplicação.

A Tabela 2.1 apresenta as características associadas a cada tipo de material aplicado.

Tabela 2.1 - Características associadas ao tipo de material aplicado

Tipo	Desempenho	Custo/ W_{DC}	Tempo de Vida
Cristal espesso	15-20%	\$7,00	± 30 anos
Poli-cristalino	12-18%	\$5,75	± 30 anos
Filmes de vapor delgados	6-12%	\$2,00	± 25 anos
Laminados	5-10%	\$1,00	± 20 anos

2.2.3.1. Agrupamento de células em matrizes

Células individuais são usualmente fabricadas em tamanho muito pequeno, cerca de 1 cm^2 em folhas contínuas com tamanho bastante longo, contendo diversas unidades. Quando expostas à luz do sol cada uma delas produz um potencial do topo à base, o qual causa o fluxo de uma corrente através da impedância conectada a partir do substrato metálico até o filme metálico externo. A corrente e potência

fornecidas pelas células dependem diretamente do número de células expostas, ou seja, do tamanho do conjunto (painel).

Usualmente os painéis fotovoltaicos manufaturados combinam 6,0 células que podem produzir 3,0 volts para uma calculadora de bolso, por exemplo. Também podem ser fabricadas 24 células em um painel que produzindo 12 V de tensão aplicáveis a diversos fins.

2.2.3.2. Características Elétricas

O tipo de célula que se utilize na construção do painel fotovoltaico, a temperatura ambiente, a intensidade luminosa que atinge as células, o ângulo de incidência e as condições do ambiente influenciam a potência de saída do mesmo. Há grande variação da eficiência das células dependendo do tipo de material utilizado em sua fabricação. As formas de onda do gráfico $V \times I$, por exemplo, podem representar este tipo de interferência.

Outro tipo de interferência ocorre pela variação de temperatura ambiente. A maioria das células é construída para trabalhar a uma temperatura de 25°C. Quando a temperatura do painel excede este valor, oscilações da temperatura da célula causam grande diferença na potência entregue pelo conjunto. A Figura 13 apresenta o comportamento da tensão e corrente, já a Figura 14 apresenta o comportamento da potência em relação à tensão.

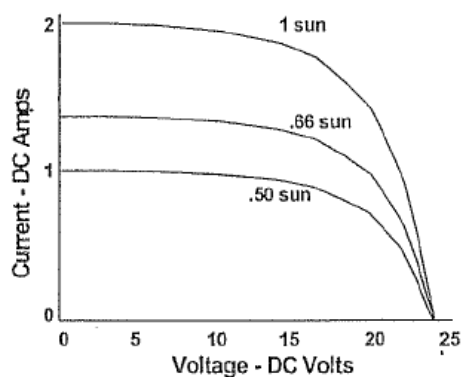


Figura 13 – Gráfico do comportamento da corrente em função da tensão em nível DC (Wills e Scott, 2000)

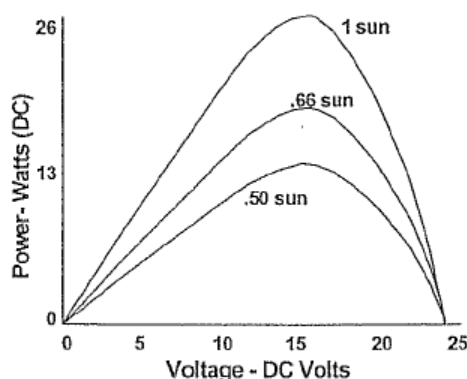


Figura 14 – Gráfico do comportamento da potência em relação à tensão em nível DC (Wills e Scott, 2000)

De modo geral a tensão sofre maior decremento que a corrente e pode ser incrementada no que se refere à temperatura do conjunto. As perdas do PV são da ordem de 0,16% a 0,33% em potência de saída para cada °C acima da temperatura de trabalho. Assim como para o aumento da temperatura, algumas células também apresentam perdas efetivas quando a temperatura está abaixo da temperatura ideal de trabalho.

2.3. Benefícios da Aplicação de GDs

Do ponto de vista da rede, ou ainda, da concessionária de distribuição, aplicar as tecnologias de GD pode ter uma conotação diferente.

Por exemplo, as fontes centralizadas, como as hidrelétricas (fonte preponderante existente no Brasil), sofrem com o fardo de arcar com os altos custos associados às perdas nas redes de transmissão. Já as GDs, uma vez que estão mais próximas à carga, não são afetadas tão diretamente por este tipo de custo, além de, em alguns casos, propiciar um benefício efetivo com redução das perdas na rede à qual estão conectadas. Assim, as GDs podem representar um acréscimo de ganhos devido a sua localização próxima à carga, aumentando a confiabilidade do sistema o qual integra.

A alocação de unidades de GD também está associada ao tamanho de tais tecnologias, como é o caso dos painéis fotovoltaicos, as microturbinas e as células a combustível. Por se tratar de unidades modulares, com tamanho bastante reduzido e de fácil instalação, o tempo para implementação deste tipo de unidades é também bastante reduzido, quando comparado ao tempo que se leva para construir uma hidrelétrica ou PCH, por exemplo.

Outros benefícios também estão associados às GDs, tanto para a concessionária como para os consumidores, tais como: energia de reserva, recorte de pico de demanda, geração em horário de pico, geração na base da carga ou ainda a ciclo combinado (aproveitamento de calor e energia). Podem-se citar também, os serviços ancilares, tais como, suporte de reativo, estabilidade para a rede, reserva girante dentre outras.

Além dos benefícios técnicos, citados anteriormente, verifica-se também ganho ou favorecimento das questões ambientais, podendo até receber o título de energias verdes, caracterizados por emitir baixos índices de poluentes. Geradores de turbinas a gás, por exemplo, liberam menos de $\frac{1}{4}$ do total de SO_2 (dióxido de enxofre), cerca de $\frac{1}{100}$ de NO_x (Óxido Nítrico) e 40% menos de CO_2 (Dióxido de Carbono) que a maioria das plantas a carvão mineral. Tais unidades são limpas o suficiente para serem alocadas próximas de unidades residenciais e comerciais (DPCA, 1998).

Obviamente não há apenas vantagens quanto à aplicação de GD. A este tipo de tecnologia estão associados problemas como: ocasional acréscimo de perdas,

problemas de segurança caso a proteção não atue adequadamente, não atendimento de modo confiável, etc.

Will e Scott (2000) relacionam algumas dessas desvantagens:

- Propriedade e operação: a compra e operação da unidade de GD requerem grande preocupação uma vez que a confiabilidade do sistema e a eficiência da operação devem garantir o atendimento à carga;
- Combustível: para que se possa operar uma unidade de GD de maneira adequada deve haver uma logística bem aplicada de abastecimento de combustível para a mesma. Por exemplo, para a aplicação de uma microturbina a gás natural, deve-se prioritariamente optar por uma região atendida pelo gasoduto. O transporte terrestre de tal combustível eleva sobremaneira seu custo.
- Tecnologias recentes: o fato de a maioria desses equipamentos serem relativamente novos gera certa insegurança quanto à sua durabilidade e eficiência. Apesar das garantias citadas pelo fabricante.

Pode-se considerar ainda que a maioria das empresas, principais interessadas neste tipo de tecnologia, tem como objetivo reduzir seus gastos com energia. Na busca pela otimização de recursos aliada a uma economia efetiva no consumo de energia elétrica, elas podem optar por adquirir um ou mais equipamentos de GD e aplicá-los segundo uma das maneiras citadas anteriormente. Além de economia, tal medida ainda pode proporcionar ganhos financeiros uma vez que o excedente dessa energia pode ser comercializado através de uma conexão com a rede de distribuição.

Esta questão é de grande interesse por parte da concessionária. No entanto o investimento necessário deve passar por uma análise aprofundada uma vez que a escolha do ponto de alocação é a principal questão.

Em alguns artigos publicados em diversas partes do mundo pode-se verificar que esta questão de confiabilidade e benefícios para o sistema é um grande motivador de diversos estudos.

Em Alinejad-Beromi et al (2007), está referenciado que após a instalação de uma unidade de GD, os efeitos sobre a confiabilidade, perfil de tensão, perdas nas linhas, intensidade da corrente de curto-circuito, assim como as quantidades de harmônicos injetados na rede devem ser avaliados separadamente. Para que se possa conectar uma unidade de GD à rede de distribuição ou transmissão, torna-se importante observar algumas características como: tipo de tecnologia, número e capacidade das unidades de GD, melhor ponto para conexão, tipo de rede e outros.

Já Peniche (2007) cita que, por não serem amplamente aplicadas para fins de conexão em paralelo à rede, estes tipos de tecnologias devem ser estudadas mais profundamente, principalmente quanto aos impactos causados na rede devido a sua conexão.

2.4. Impactos de GDs sobre a Rede de Distribuição

Dentre os impactos mais preocupantes estão aqueles relacionados à qualidade da energia elétrica fornecida. Para que a conexão seja a melhor possível são necessários testes e análises de diversos parâmetros que visam garantir tanto a segurança da instalação quanto o fornecimento de uma energia limpa e confiável, que nos padrões nacionais devem atender principalmente a norma IEEE 1547.1 “*IEEE Standard for Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*”, o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição da ANEEL e o Submódulo 2.2 dos Padrões de Desempenho da Rede Básica do ONS.

No Brasil, tem-se um panorama onde quase todas as empresas de energia, principalmente as distribuidoras, estão promovendo grandes esforços para conhecer a fundo as tecnologias de geração distribuída, tanto do ponto de vista da geração como também da proteção. Aliás, esta última merece profundos estudos uma vez que representa uma preocupação concreta para a implantação da GD e conexão à rede de distribuição.

Assim, se o sistema de proteção não for adequadamente dimensionado podem ocorrer problemas como acidentes em manutenções ou a detecção de fluxo reverso nas linhas onde está conectada, podendo causar danos à rede e aos clientes caso ocorra um transitório que não seja suprimido adequadamente.

As GDs são equipamentos de geração de energia elétrica que podem ser concebidos a partir de máquinas síncronas (mais comum). Esta tecnologia é bastante difundida e conhecida, além de ser de fácil operação quando no modo de gerador.

De modo geral, as máquinas síncronas são bastante flexíveis em responder rapidamente oscilações da carga. Os geradores síncronos quando conectados ao sistema de distribuição operam sob fator de potência constante ou sob controle de potência reativa constante.

No entanto, máquinas síncronas de baixa potência não apresentam boa capacidade para controle de tensão quando em modo *grid connected*, pois competem entre si pela regulação de tensão.

Quando se parte do princípio que uma unidade de GD está conectada à rede, tem-se que considerar que esta deve ser capaz de se desconectar do sistema sempre que houver problemas ou transitórios que possam comprometer tanto o sistema quanto a mesma. Assim, adotam-se estratégias de controle onde a proteção da máquina deve ser sensível o suficiente para retirá-la de operação em tais condições.

Um exemplo clássico é quando ocorre o desligamento da rede. Caso a proteção da GD não atue efetivamente, pode ocorrer o fenômeno de ilhamento onde a GD passa a alimentar o sistema remanescente com a potência que está programada. Isso pode gerar acidentes graves onde um eletricitista que vai fazer a manutenção, acreditando que o sistema está desenergizado, pode ser submetido a tensões e correntes potencialmente perigosas.

Assim, para uma operação ideal é necessário um estudo aprofundado sobre os critérios de proteção do ponto onde está alocada a GD.

Outra questão impactante a ser analisada são as perdas elétricas que decorrem da circulação de corrente através das linhas. Para se reduzi-las, podem-se diminuir a corrente, a resistência ou ambas. Se a GD é utilizada para prover potência localmente, as perdas podem ser reduzidas devido à diminuição da corrente que flui advinda do sistema (KHOA, BINH e TRAN, 2006). Tal conclusão permite verificar que, conforme a Figura 15, o tamanho da GD conectada a uma determinada barra faz variar a corrente que flui pelo condutor conectado a ela. Tal variação pode promover a redução nas perdas ou não, dependendo se a barra escolhida é a melhor do alimentador.

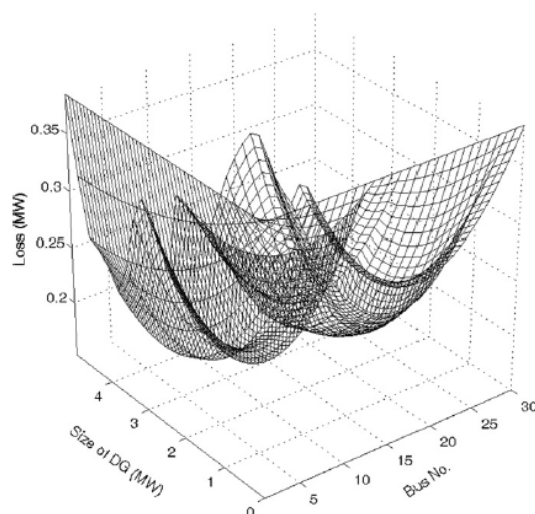


Figura 15 – Efeitos sobre as perdas do sistema devido à alocação ótima e dimensionamento de GD (Acharya,N., 2006)

Outra característica do sistema é a redução gradual da bitola dos condutores ao longo do alimentador. Para se escolher o local ideal para alocação da fonte de GD se deve ter em mente que, para alguns casos, um recondutoramento deve ser necessário. Isto é, se houver a intenção de exportar os excedentes de energia para o sistema. A injeção de potência em dado ponto do sistema pode ser nocivo uma vez que o condutor local pode não ser adequado para permitir um fluxo de potencia maior que aquele verificado antes da alocação da fonte.

2.5. Considerações Finais

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito de técnicas para alocação de Geração Distribuída em redes de distribuição, tecnologias de GD, fluxos de potências em redes de distribuição e análise de sensibilidade sobre pontos mais propícios à conexão das mesmas na rede.

Uma ampla gama de artigos foi descrita e tudo o que pôde se considerar significativo foi anotado e aplicado, com o objetivo de obter os melhores resultados possíveis para a proposta adotada.

CAPÍTULO 3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

3.1. Introdução

As técnicas de computação evolucionária são grandes aliadas ao desenvolvimento de trabalhos associados ao ramo da engenharia e, especialmente ao setor de energia elétrica. Tais ferramentas têm a função de permitir análise de diferentes variáveis, acelerando assim o processo de tomada de decisão por parte do operador ou planejador do sistema elétrico.

Entre essas técnicas podem-se citar as Estratégias Evolucionárias, a Programação Evolucionária, a Programação Genética e, principalmente, devido aos trabalhos pioneiros de John Holland (HOLLAND, 1975), os Algoritmos Genéticos – AG, que é a técnica utilizada nesse trabalho, devido às boas experiências relatadas na literatura para solução do problema de escolha do melhor ponto de conexão de GDs em redes de distribuição.

Desse modo, cabe nesse capítulo, apresentar uma introdução acerca de Algoritmos Genéticos, discorrendo sobre sua estrutura e características adotadas para a solução do problema de alocação das GDs.

3.2. Algoritmos Genéticos (AGs)

Algoritmos Genéticos (AGs) são programas evolutivos inspirados na Teoria de Seleção Natural. Eles atuam sobre uma população de indivíduos baseados no fato de que os indivíduos com boas características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de produzirem indivíduos cada vez mais aptos, enquanto os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer. Nos AGs, normalmente, cada indivíduo da população, corresponde a uma solução.

Um trabalho de busca ou otimização considera todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e a função de avaliação ou função de custo é

uma maneira de avaliar as soluções no espaço de busca. Existem muitos métodos de busca e funções de avaliação, sendo o AG um deles (GOLDBERG, 1997).

Os AGs baseiam-se inicialmente na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dado um índice (*fitness*), refletindo sua habilidade de adaptação a um determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características, através de cruzamentos, mutações e recombinação, gerando descendentes para a próxima geração.

A Figura 16 apresenta um exemplo de cromossomo composto por genes binários:

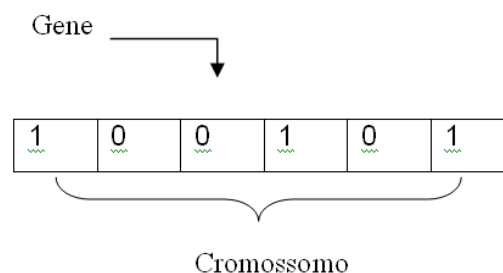


Figura 16 – Representação de Cromossomo de Genes Binários

A função objetivo é a função que tem a responsabilidade de classificar e qualificar os indivíduos dentro de uma população.

A codificação dos indivíduos que é tida como uma das etapas mais críticas da formulação do problema utiliza, classicamente, arranjos binários de tamanho fixo que representam os cromossomos.

$$\text{Indivíduo (AG)} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^t$$

Um conjunto de indivíduos forma a população de Algoritmos Genéticos. A determinação da população inicial de um AG é completamente aleatória para a maioria dos problemas.

3.2.1. Estrutura dos Algoritmos Genéticos (AGs)

Os Algoritmos Genéticos procuram a melhor população, composta pelos melhores indivíduos, que atendam a maximização ou minimização da função objetivo.

Para tanto diversas etapas devem ser cumpridas seguindo-se um fluxograma como o apresentado na Figura 17. Como se pode observar, uma população aleatória é gerada inicialmente contendo as características que devem ser avaliadas pelos Algoritmos Genéticos através de determinadas heurísticas que determinam possíveis soluções para o problema apresentado.

As soluções são apresentadas pelo processo de *fitness* do AG onde, para cada indivíduo testado, é atribuído um valor que o classifica segundo sua habilidade de adaptação no ambiente gerado. Parte dos indivíduos melhor classificados é preservada enquanto os demais são descartados.

Dentre os indivíduos selecionados, alguns sofrem algumas modificações como mutação e recombinação, gerando descendentes para a próxima geração mais adaptados e, portanto, mais aptos a alcançar o ponto de mínimo/máximo global.

Este processo se repete sucessivas vezes até que o melhor indivíduo seja selecionado, caracterizando assim a convergência do problema para a solução ótima.

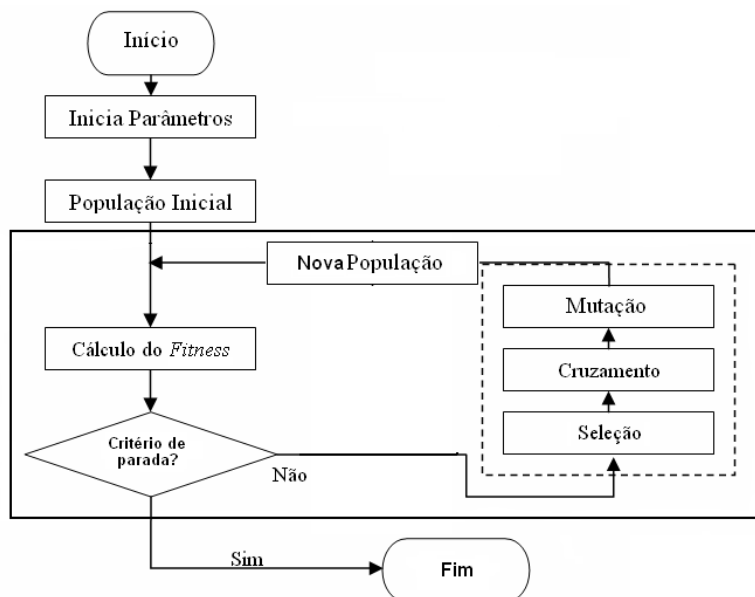


Figura 17 – Fluxograma de funcionamento de um AG (SZUVOVIVSKI, 2008)

3.2.2. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos transformam a população através de sucessivas gerações, buscando melhorar a aptidão ou *fitness* do indivíduo. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Basicamente, os AG utilizam três operadores: seleção, cruzamento e mutação.

3.2.3. Seleção

A cada geração devem-se selecionar quais indivíduos possuirão cópias e quais deverão desaparecer. Assim, um operador de seleção cujo objetivo é selecionar os indivíduos que sofrerão cruzamento e mutação torna-se imprescindível. A seleção pode ser definida de maneira simples como sendo a escolha probabilística de indivíduos de uma população tendo como base as suas aptidões e, da mesma forma que ocorre no processo de seleção natural, os indivíduos mais qualificados ou aptos, de acordo com a função objetivo, têm mais chances de serem selecionados.

Para privilegiar os indivíduos mais aptos no processo de seleção, a cada membro da população é atribuído um valor absoluto dado por uma função

denominada de função de aptidão, recebendo como entrada os valores do gene do indivíduo e fornecendo como resultado sua aptidão.

Ao se associar uma nota de aptidão a cada indivíduo da população, escolhe-se então um subconjunto de indivíduos da população atual, gerando uma população intermediária.

Métodos como da Roleta, do Torneio e Método da Amostragem Universal Estocástica, além do elitismo são alguns daqueles sugeridos para a solução deste tipo de problema com aplicação de AGs (SZUVOVOIVSKI, 2008).

3.2.4. Elitismo

O elitismo é uma técnica que pode ser adicionada a qualquer método de seleção. É utilizado para contornar a possibilidade de descarte dos melhores indivíduos de uma geração, o que pode acontecer em qualquer método de seleção, e consiste em transferir os n melhores indivíduos de uma geração para a geração seguinte, antes de ocorrer a seleção dos indivíduos.

3.2.5. Roleta

No método da Roleta, a probabilidade de um indivíduo ser selecionado é proporcional à sua aptidão. O nome deriva de uma analogia que pode ser realizada para facilitar sua compreensão, a seleção seria um sorteio aleatório em uma roleta, na qual os setores referentes a cada indivíduo seriam proporcionais às suas aptidões.

A roleta (Figura 18) é então girada tantas vezes quantas forem necessárias para obter o número requerido de indivíduos para o cruzamento e mutação, e, logicamente os indivíduos com maior valor de aptidão têm maior chance de serem selecionados.

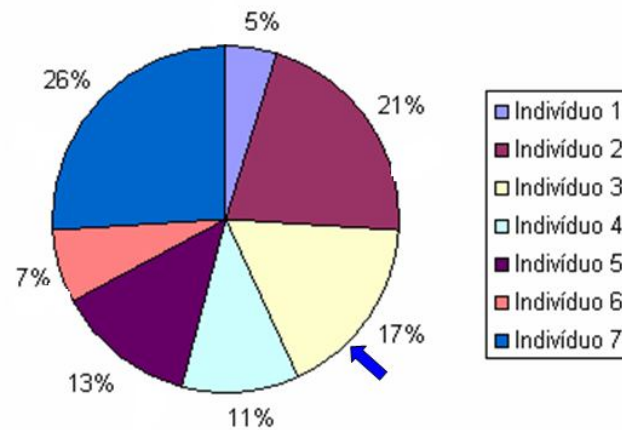


Figura 18 – Simbologia do Método da Roleta

3.2.6. Torneios

No método do Torneio, n indivíduos da população são selecionados aleatoriamente, e aquele com maior aptidão dentre os n indivíduos, é selecionado para a população intermediária. O processo é repetido até que a população intermediária seja preenchida. Geralmente utiliza-se 2 ou 3 indivíduos para a disputa do torneio.

Este método é muito utilizado, pois oferece a vantagem de não exigir que a comparação seja feita entre todos os indivíduos da população e possui a vantagem da não geração de super indivíduos, pois a chance do indivíduo com maior grau de aptidão se selecionado a um torneio é a mesma de um indivíduo de menor grau, independentemente de seu grau de aptidão ser alto.

3.2.7. Amostragem Universal Estocástica

O método da Amostragem Universal Estocástica pode ser considerado como uma variação do método da roleta, na qual, ao invés de um único ponteiro, são colocadas n ponteiros igualmente espaçados, sendo n o número de indivíduos a serem selecionados para a população intermediária. Dessa forma, a roleta é girada uma única vez, ao invés de n vezes, selecionando assim os indivíduos, conforme Figura 19.

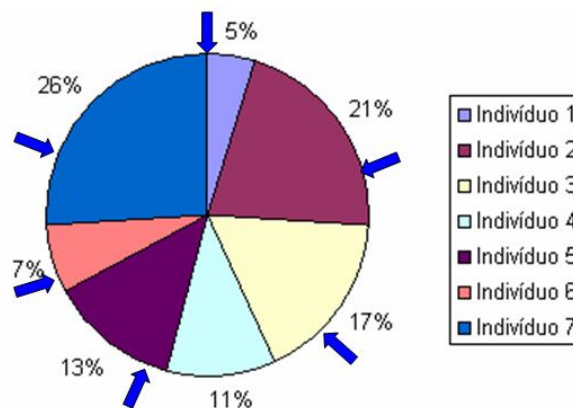


Figura 19 – Simbologia do Método da Amostragem Universal Estocástica

Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem uma maior área terão maior probabilidade de serem selecionados por várias vezes. Conseqüentemente, a seleção de indivíduos pode conter várias cópias de um mesmo indivíduo, enquanto outros podem desaparecer.

3.2.8. Cruzamento

A reprodução é uma etapa inspirada na natureza e tem por objetivo criar novas soluções na população. O princípio básico dos operadores de cruzamento é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores de cruzamento são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

Durante a fase de reprodução, selecionam-se indivíduos da população que serão recombinados para formar descendentes que, por sua vez, constituirão a geração seguinte. Os pares são selecionados aleatoriamente, usando um método que favoreça os indivíduos melhor adaptados. Seus cromossomos se mesclam e se combinam.

O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante o processo reprodutivo, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Ele é considerado o operador genético predominante,

por isso é aplicado com probabilidade dada pela taxa de cruzamento entre 70 e 100% (SZUVOVIVSKI, 2008).

Quanto maior for essa taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar.

Existem diversos tipos de operadores de cruzamento, porém, os mais tradicionais são:

Cruzamento em 1 ponto: Seleciona-se um ponto de corte do cromossomo e, a partir desse ponto, realiza-se a troca de material cromossômico entre os dois indivíduos, gerando dessa forma dois descendentes onde cada um dos dois filhos recebe informação genética de cada um dos pais, conforme Figura 20.

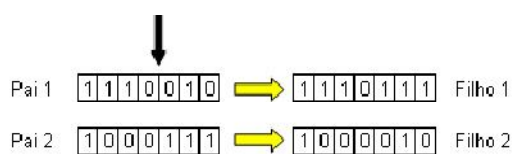


Figura 20 – Simbologia para o Cruzamento em 1 ponto

Considerações importantes acerca desse tipo de cruzamento é que os filhos gerados podem ser completamente diferentes dos pais, mantendo características em comum. A posição onde o gene paterno apresenta o mesmo valor não é modificada com o cruzamento, garantindo que as melhores informações sejam transferidas aos descendentes.

Cruzamento em 2 pontos: No cruzamento em dois pontos procede-se de maneira similar ao cruzamento de um ponto, selecionando-se aleatoriamente dois pontos de corte do cromossomo e trocando o material cromossômico entre os dois indivíduos, gerando dois descendentes como representado na Figura 21.

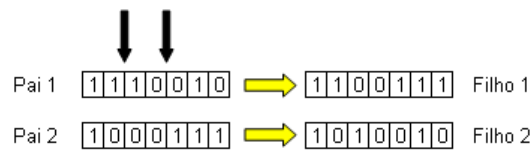


Figura 21 – Simbologia para o Cruzamento em 2 pontos

Cruzamento Disperso: Este tipo de cruzamento apresenta grande diferença dos demais. O ponto de corte é substituído por um vetor binário aleatório também chamado de máscara (Figura 22).

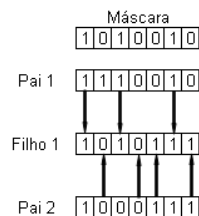


Figura 22 – Simbologia para o Cruzamento Disperso

A cópia dos genes dos pais segue a indicação dos bits da máscara. Ou seja, quando o bit da máscara corresponde a 1, então o filho recebe o bit do pai 1. Da mesma forma, quando o bit da máscara corresponde a 0, o filho recebe o bit do pai 2.

Cruzamento Uniforme: O cruzamento uniforme e o disperso são semelhantes, no entanto, após o cruzamento uniforme surgirão dois novos filhos, ao invés de apenas um como ocorre com o cruzamento disperso (Figura 23).

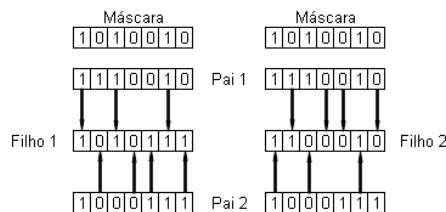


Figura 23 – Simbologia para o Cruzamento Uniforme

A grande diferença é que o segundo indivíduo é gerado da maneira oposta ao primeiro, ou seja, os bits 0 da máscara transferem os bits do pai 1, enquanto os bits 1 da máscara transferem os bits do pai 2.

3.2.9. Mutação

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida (Figura 24), o que fornece meios para introdução de novos elementos na população.

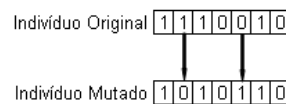


Figura 24 – Simbologia para Mutação, representando apenas os genes modificados

Desta maneira a mutação assegura que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois este mecanismo altera levemente a direção da busca.

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação que comumente varia de 0,1 a 10%. Uma baixa taxa de mutação previne que a busca fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca, além disso, possibilita que qualquer ponto do espaço de busca seja atingido. A atribuição de altas taxas de mutação torna a busca aleatória.

3.3. Considerações Finais

Esse capítulo apresentou a técnica dos AGs, que foi a técnica selecionada nesse trabalho devido às boas experiências relatadas na literatura para solução do problema de escolha do melhor ponto de conexão de GDs em redes de distribuição.

Assim, foram descritas cada uma das principais características dos AGs a serem utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO 4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

4.1. Introdução

Uma vez feita a revisão bibliográfica e estudados os conceitos sobre Geração Distribuída e Algoritmos Genéticos, torna-se necessário desenvolver a metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho.

Basicamente, essa metodologia determina em qual barra (ou barras) da rede de distribuição se deve conectar a GD (ou as GDs) previamente selecionadas, sendo que ainda há a possibilidade de especificar a potência das GDs entre dois valores previamente selecionados.

Assim, o primeiro objetivo desse capítulo é a apresentação da formulação matemática representado como um problema de otimização, cujas funções objetivo são: minimização das perdas, das violações de tensão, das quedas de tensão e dos custos de conexão das GDs.

A avaliação dos critérios de otimização requer a solução das equações de balanço de potência ativa e reativa, obtidas pela solução de um FPO simplificado, a ser descrito em detalhes nesse capítulo.

A fim de se diminuir o campo de busca para obtenção da solução desse problema de otimização, apresenta-se, ainda nesse capítulo, uma análise de sensibilidade que visa obter um conjunto de melhores barras candidatas às conexões das GDs.

Finalmente, é apresentada a codificação dos indivíduos utilizados pelos Algoritmos Genéticos, bem como os parâmetros dos AGs adotados para a realização do processo iterativo.

4.2. Critérios de Otimização

A premissa inicial do problema é a de que a tecnologia de GD que se deseja instalar é conhecida, ou seja, seu custo de aquisição já fora contabilizado em estudos prévios, pretendendo-se então levantar, nesse estudo, questões mais técnicas quanto ao ponto de conexão da mesma ao Sistema de Distribuição.

Além de suprir geração adicional, a instalação de GD induz ao uso mais eficiente da rede, pois, se devidamente localizada, diminui as perdas elétricas, melhora o perfil de tensão do alimentador e pode resolver questões de sobrecarga nos cabos dos alimentadores.

Assim, para este problema, foi moldada uma função que avalia as variáveis citadas anteriormente e que interferem no processo de inserção da GD em sistemas de distribuição. Foram consideradas também as violações de tensão, as quedas de tensão maiores que 4 %, as violações de fluxo de potências ativas circulantes pelos cabos do alimentador e finalmente, o custo de conexão à rede.

Cada um desses critérios a serem considerados caracteriza um problema multi-critérios que contempla a minimização das seguintes funções:

$$FO = \min f_1, f_2, f_3, f_4 \quad (1)$$

onde

- f_1 : perdas ativas;
- f_2 : violação de limites de tensão;
- f_3 : violação de queda de tensão;
- f_4 : custo de conexão da GD.

4.2.1. Perdas de Potência Ativa

Para a injeção de potência ativa no sistema, se faz necessária a injeção de reativos, uma vez que este tipo de insumo é essencial em se tratando de máquinas elétricas, transformadores e outros elementos. Esta potência reativa que flui pelas

linhas dos sistemas de distribuição causa efeitos indesejáveis como, por exemplo, o aumento das perdas de potência ativa por efeito joule, por exemplo.

Para estudos de planejamento, é importante verificar a inserção de GDs num horizonte de tempo de até 5 anos. Já do ponto de vista de conexão é importante se analisar vários patamares de carga (pesada, média e leve) para dias úteis de semana.

Assim, as perdas de potência ativa para cada uma das condições de carga ao longo de 5 anos devem ser calculadas a fim de se obter o valor da energia total consumida pelas perdas durante todos os 5 anos através da seguinte equação:

$$f_1 = Energia = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 Perdas_{ij} \cdot Horas_i \cdot Dias \quad (2)$$

onde

i : corresponde a condição de carga Pesada, Média e Leve;

j : corresponde ao ano considerado;

$Perdas_{ij}$: perda de potência ativa correspondente à condição de carga i no ano j ;

$Horas_i$: número de horas correspondente à condição de carga i ;

$Dias$: número de dias úteis no ano.

Os números de horas referentes a cada patamar de carga estão apresentados na Tabela 4.1. O número de dias úteis em um ano típico foi considerado como sendo 249, conforme análise de curvas de carga de alimentadores típicos, levando-se em conta os patamares de carga pesada, média e leve.

Tabela 4.1 - Número de Horas para cada condição de Carga para dia útil (DU)

Patamar de Carga	Número de horas
Pesada	4
Média	14
Leve	6

4.2.2. Violações dos Limites de Tensão

A Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001 da ANEEL, determina que o sistema elétrico deva atender aos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente preestabelecidos, sendo que estes são fiscalizados e sujeitos a multas.

Desta forma, após simular a rede e conhecer as magnitudes de tensões em todas as barras para cada uma das condições de carga consideradas, buscam-se as barras cujas magnitudes estão fora dos limites estabelecidos pela Resolução N° 505/2001, obtendo-se as violações desses limites da forma apresentada na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Regras para obtenção das violações dos limites de tensão

Se	Então
$V_{\text{mínimo}} \leq V_{\text{barra}} \leq V_{\text{máximo}}$	$\text{Violação_tensão}_{\text{barra}} = 0$
$V_{\text{barra}} < V_{\text{mínimo}}$	$\text{Violação_tensão}_{\text{barra}} = V_{\text{mínimo}} - V_{\text{barra}}$
$V_{\text{barra}} > V_{\text{máximo}}$	$\text{Violação_tensão}_{\text{barra}} = V_{\text{barra}} - V_{\text{máximo}}$

Os valores de $V_{\text{mínimo}}$ e $V_{\text{máximo}}$ são os limites da escala de tensão adequada estabelecidos pela Resolução nº 505/2001, ou seja, $V_{\text{mínimo}} = 0,93 \text{ pu}$ e $V_{\text{máximo}} = 1,05 \text{ pu}$.

A partir dos valores de violação de tensão, obtidos para cada condição de carga em cada ano, determina-se o total do sistema dentro do período estudado, conforme a seguinte equação:

$$f_2 = \text{Violação_V} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \text{Violação_tensão}_{ij} \quad (3)$$

onde

Violação_V : violação de tensão total do sistema em um ano.

Violação_tensão_{ij} : violação de tensão de todas as barras para a carga i no ano j.

Ressalta-se também que o nível de tensão fixado na barra inicial do alimentador depende do patamar de carga, sendo apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Tensão na barra inicial para cada condição de carga

Patamar de Carga	Tensão na Barra Inicial [pu]
Pesada	0,9928
Média	0,9783
Leve	0,9565

4.2.3. Custo das Violações das Quedas de Tensão

Conforme recomendação da COPEL (1996b) existe um custo adicional quando a queda de tensão entre as barras da rede de distribuição e a barra inicial do alimentador são maiores que 4%. A essas diferenças se deve aplicar um custo adicional na Função Objetivo relativo a tais desvios.

Desta forma, para cada patamar de carga, buscam-se as barras que apresentam uma queda de tensão maior que 4% e aplica-se para essas barras a equação mostrada a seguir, somando os valores encontrados para as dez condições de carga.

$$f_3 = \text{Custo_Queda_Tensão} = 1,144 \cdot VD \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \left\{ \text{Horas}_{ij} \cdot \text{Dias}_j \cdot \sum_{b \in \Phi} \left[(QT_{bij} - 4)^{1,45} \cdot P_{ij} \cdot CP_b \right] \right\} \quad (4)$$

onde

VD – valor do dólar (por exemplo, R\$ 2,37 – cotação em 06/03/09);

b – barra com queda de tensão superior a 4%;

Φ – Conjunto de barras com queda de tensão superior a 4%;

QT_{bij} – tensão na barra b referente ao patamar de carga i e dia da semana j;

P_{ij} – porcentagem da carga pesada referente ao patamar de carga i e dia j;

CP_b – valor da carga pesada na barra b.

4.2.4. Custo de Conexão

Já que o enfoque está baseado na alocação de uma determinada tecnologia já previamente escolhida, em uma região já determinada, o problema de alocação acaba se restringindo à escolha do melhor ponto de conexão dentro da área de abrangência da GD.

Assim, deve ser contemplado o custo de instalação da GD (R\$/km para as categorias de potência). Ou seja, a partir das coordenadas da fonte é possível obter as distâncias desta para cada barra k do sistema ($distância_k$) e assim obter o seu custo de conexão em reais.

Desse modo, uma quarta função objetivo passa a ser incluída no problema de otimização multi-critério que é a minimização do custo de conexão da GD:

$$f_4 = \text{Custoconexão} = \text{Custo} \cdot \text{distância}_k \quad (5)$$

onde

Custoconexão = custo de conexão da GD (em estudo) na barra k .

4.3. Programação Multiobjetivo

Como o problema a ser resolvido é de múltiplas funções objetivos, cabe colocar algumas considerações sobre esse ramo da otimização matemática.

Em problemas com um único objetivo, a solução ótima é obtida através da simples maximização (ou minimização) de uma função objetivo de variáveis de decisão sujeita a uma série de restrições práticas. Diferentemente disso, a análise Multiobjetivo seleciona a solução de melhor compromisso em um cenário em que existem múltiplos critérios. Aqui, busca-se a otimização do conjunto das funções objetivo, através de critérios e julgamento das alternativas de solução possíveis, ou seja, um problema de otimização Multiobjetivo consiste em determinar um vetor de variáveis de decisão, que otimiza uma função vetorial, cujos elementos representam os índices de desempenho a serem otimizados.

A solução que minimiza um índice provavelmente não minimiza os outros, sendo assim necessário introduzir o conceito de Otimalidade de Pareto. Segundo esse conceito, uma solução viável para um problema de programação Multiobjetivo é uma solução de Pareto, se não existir outra solução que irá produzir uma melhora em um objetivo sem causar uma degradação em pelo menos um dos outros (LIN, 1976).

No problema de otimização Multiobjetivo cabe colocar que não existe somente uma solução ótima e sim um conjunto de possíveis soluções denominadas eficientes ou Pareto-ótimo. E, como não se conhece a importância de cada um dos objetivos, todas as soluções Pareto-ótimo são igualmente importantes (PEREIRA e MANTOVANI, 2006).

Algoritmos evolucionários são apropriados para problemas de otimização Multiobjetivo porque lidam simultaneamente com um conjunto de possíveis soluções, na qual permitem encontrar um conjunto de soluções Pareto-ótima em uma única simulação. O que não acontece com técnicas tradicionais de programação matemática onde cada solução é obtida e deve ser guardada para compor um conjunto de soluções Pareto-ótima (COELLO,1999).

Na literatura é possível encontrar uma variedade de métodos como forma de resolver um problema de otimização Multiobjetivo. Os métodos de resolução deste tipo de problema podem ser classificados em dois grupos (ARRUDA *et al*, 2006):

- Definidas prioridades e/ou pesos entre os vários objetivos de interesse, encontra-se a solução ótima segundo estas informações fornecidas a priori;
- Sem nenhuma informação adicional, encontra-se o conjunto das soluções ótimas de Pareto para dentre estas se escolher uma a posteriori.

Exemplos de métodos do primeiro grupo são: Programação Objetiva, Método do Critério Global, Recozimento Simulado e métodos evolucionários em que se combinam as diversas funções objetivo dentro de uma única função, obtendo como resultado da otimização uma solução única. Por outro lado, existem outros métodos

evolucionários que se enquadram no segundo grupo calculando um grande número de soluções ótimas de Pareto para uma escolha pessoal posterior.

Os Algoritmos Genéticos utilizam uma função objetivo única como os métodos do primeiro grupo, mas calculam através de uma técnica elitista, um conjunto de soluções ótimas das quais são selecionadas as soluções de Pareto, como os métodos do segundo grupo.

Para a construção da função de avaliação dos AGs, podem ser utilizados os seguintes métodos de modelagem de problemas de otimização Multiobjetivo: o método do critério global, método das ponderações e método da penalização.

Devido às vantagens do método de critério global, o mesmo será utilizado na formulação desse problema, sendo descrito a seguir.

O Método do Critério Global utiliza o valor ótimo como base de cálculo para definir o grau de aptidão de um indivíduo. Esse método converte a função Multiobjetivo em um único objetivo sendo expresso matematicamente pela seguinte função:

$$\min \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right)^P \quad (6)$$

onde f_i^* é o valor ótimo, n é a quantidade de objetivos e P um valor de projeto, normalmente sendo definido como 1 ou 2.

No entanto, critérios com grandezas diferentes podem dominar a avaliação final e com isso prejudicar critérios com magnitudes menores. Assim, adaptou-se o Método do Critério Global, normalizando cada critério através do conhecimento do valor ótimo (f_i^*) e do pior caso (f_i^{\max}), conforme (WESTPHAL, 2006):

$$\min \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i - f_i^*}{f_i^{\max} - f_i^*} \right) \quad (7)$$

onde $F(x)$ é o resultado da composição de todos os objetivos, f_i^{\max} é o pior caso para o critério i , $f_i(x)$ é o resultado do critério i para o indivíduo ' x ' e f_i^* é o valor ideal para o objetivo i . Ao normalizar a rede, os resultados ficam dentro da faixa $[0;1]$, de tal forma que 0 é o valor ótimo, ou seja, todos os critérios foram cumpridos. $F(x)$ com valor igual a 1 significa que nenhum critério foi atendido. Qualquer valor entre 0 e 1 mostra que o critério foi atendido parcialmente.

Assim, o problema passa a ser o seguinte:

$$\min \frac{f_1 - f_1^0}{f_{\max_1} - f_1^0} + \frac{f_2 - f_2^0}{f_{\max_2} - f_2^0} + \frac{f_3 - f_3^0}{f_{\max_3} - f_3^0} + \frac{f_4 - f_4^0}{f_{\max_4} - f_4^0} \quad (8)$$

onde

f_1 : perdas;

f_2 : violação de limites de tensão;

f_3 : violação de queda de tensão;

f_4 : custo de conexão da GD;

f_1^0 : valor ideal de perdas totais;

f_2^0 : valor ideal de violação de limites de tensão;

f_3^0 : valor ideal de queda de tensão;

f_4^0 : valor ideal de custo de conexão da GD;

f_{\max_1} : pior caso de perdas totais. Considera-se o valor de perda total antes da alocação da GD;

f_{\max_2} : pior caso de violação de limites de tensão. Considera-se a violação obtida antes da alocação da GD;

f_{\max_3} : pior caso de queda de tensão. Considera-se o valor obtido antes da alocação da GD;

f_{\max_4} : pior caso de custo de conexão. Considera-se conexão na barra mais distante da GD, ou seja, $Custo \cdot \max(distancia_k)$.

Os valores ideais das respectivas funções objetivos foram considerados nulos por simplicidade.

4.4. Fluxo de Potência

A técnica de AGs para se alocar GD requer uma avaliação de cada solução gerada. Para que se faça essa avaliação é necessária a obtenção do novo estado da rede com a instalação do equipamento em estudo a fim de se verificar os benefícios/malefícios, ou seja, é necessária a resolução de um Fluxo de Potência – FP.

Além disso, conforme o porte da GD inserida no alimentador pode haver necessidade de se controlar a tensão da barra na qual ela está conectada e para tanto há necessidade de se ajustar o valor de potência reativa a ser gerada. Esse controle de tensão e potência reativa não pode ser realizado com os métodos de varredura.

Com base no exposto, será adotado como método para resolver a rede elétrica o FPO solucionado pelo Método de Pontos Interiores versão Primal-Dual (FERNANDES, 2004), apresentado no ANEXO A.

4.4.1. Fluxo de Potência Ótimo – FPO

O problema de Fluxo de Potência Ótimo – FPO, formulado inicialmente por CARPENTIER (1962), determina o estado de uma rede elétrica que otimiza uma determinada função-objetivo e satisfazendo um conjunto de restrições físicas e operacionais.

Caracterizado como um problema de programação não-linear com restrições, o problema de FPO pode ser formulado genericamente como:

$$\min f(u) \tag{9}$$

Sujeito a:

$$g(u) = 0 \tag{10}$$

$$h^{\min} \leq h(u) \leq h^{\max} \tag{11}$$

onde

u – vetor de variáveis do sistema;
 f(u) – função objetivo a ser otimizada;
 g(u) – vetor de restrições de igualdade;
 h(u) – vetor de restrições de desigualdade.

As restrições de igualdade correspondem à modelagem da rede, ou seja, às equações de balanço de potência ativa e reativa; enquanto que as restrições de desigualdade representam os limites das variáveis do sistema, ou seja, as restrições funcionais e operacionais dos equipamentos do sistema.

4.4.2. Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade básicas do FPO correspondem às equações já apresentadas do fluxo de carga, ou seja:

$$\mathbf{Pg} - \mathbf{Pd} = \text{real} [\dot{\mathbf{V}} \cdot (\dot{\mathbf{Y}} \cdot \dot{\mathbf{V}})^*] \quad (12)$$

$$\mathbf{Qg} - \mathbf{Qd} = \text{imag} [\dot{\mathbf{V}} \cdot (\dot{\mathbf{Y}} \cdot \dot{\mathbf{V}})^*] \quad (13)$$

$$|\dot{\mathbf{V}}_1| = V_{saída} \quad (14)$$

onde

Pg – vetor com geração de potência ativa com dimensão (nb x 1);
 Pd – vetor de demanda de potência ativa com dimensão (nb x 1);
 Qg – vetor com geração de potência reativa com dimensão (nb x 1);
 Qd – vetor de demanda de potência reativa com dimensão (nb x 1);
 $\dot{\mathbf{V}}$ – vetor com tensão fasorial com dimensão (nb x 1);
 $\dot{\mathbf{Y}}$ – matriz de admitância de barra com dimensão (nb x nb);
 $\dot{\mathbf{V}}_1$ – tensão fasorial na barra da SE;
 Vsaída – tensão de saída do alimentador que depende do patamar de carga.

4.4.3. Restrições de Desigualdade

As restrições de desigualdade correspondem às restrições de canalização nas variáveis e restrições funcionais do tipo máximo carregamento em circuitos. Estas restrições refletem limites de operação dos equipamentos ou alguma política

operativa específica. Desta forma, as principais restrições de desigualdades utilizadas em problemas de FPO são apresentadas a seguir em sua forma geral:

$$Pg_k^{\min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{\max} \quad k=1,\dots,nb \quad (15)$$

$$Qg_k^{\min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{\max} \quad k=1,\dots,nb \quad (16)$$

onde

Pg_k – potência ativa gerada na barra k ;

Qg_k – potência reativa gerada na barra k ;

Repara-se que não foram considerados os limites nas magnitudes de tensão e de fluxo de potências ativa nas linhas, pois em caso de violação dessas grandezas, o problema de otimização não converge o que leva a tempos computacionais muito elevados.

No entanto, essas violações foram consideradas na função objetivo do problema resolvido pelos AGs (equações 3 e 5). Desse modo, indiretamente, as mesmas estão consideradas no problema, não deixando de serem atendidas pela formulação.

Como se tem interesse na minimização das perdas, esse critério também é utilizado na formulação do FPO:

$$LO = \sum_{k,m \in C_{CS}} (P_{km} + P_{mk}) \quad (17)$$

onde

CCS : conjunto de circuitos do sistema.

Assim a formulação do problema que analisa a rede é:

min LO

s.a.

$$\mathbf{Pg} - \mathbf{Pd} = \text{real} [\dot{\mathbf{V}} \cdot (\dot{\mathbf{Y}} \cdot \dot{\mathbf{V}})^*] \quad (18)$$

$$Q_g - Q_d = \text{imag} [\dot{V} \cdot (\dot{Y} \cdot \dot{V})^*] \quad (19)$$

$$|\dot{V}_1| = V_{saída} \quad (20)$$

4.5. Análise de Sensibilidade para Restringir Campo de Busca

A alocação de GD é um problema de otimização onde se pretende minimizar o custo de conexão dos equipamentos, perdas e as violações no perfil de tensão e fluxo nas linhas.

Como o problema tem grandes proporções, assume-se que apenas algumas barras da rede básica são candidatas à alocação de GD.

Conforme citado em Acharya, Mahat e Mithulanathan (2006), as barras foram ordenadas de acordo com os valores obtidos, a partir dos maiores valores de sensibilidade, sendo que os maiores valores representam as melhores candidatas do sistema em estudo para alocação da GD.

Já essa dissertação foca principalmente a minimização das perdas, pois é um dos quesitos mais impactantes em termos de custo para a rede de distribuição. Assim, inspirando-se nos trabalhos citados anteriormente, buscaram-se outras maneiras de se diagnosticar conjuntos de barras candidatas à alocação de GD das seguintes formas:

(i) Através das barras com os maiores multiplicadores de Lagrange (SOUSA, 2003). Ao se resolver um fluxo de potência ótimo cuja função objetivo é a minimização das perdas de transmissão ($f(x)$), obtém-se também os multiplicadores de Lagrange que podem ser utilizados para se determinar as barras que são candidatas a terem alocação de GD. A interpretação dos multiplicadores de Lagrange (λ_{p_i}) relacionadas às equações de balanço de potência ativa, é que eles fornecem uma relação de sensibilidade entre a função objetivo ($f(x)$) e a variação de carga ativa:

$$\lambda p_i = \frac{\partial f(x)}{\partial Pd_i}, \quad i=1,\dots,nb \quad (21)$$

Ou seja, as barras com os maiores multiplicadores de Lagrange positivos indicam os pontos cuja variação de carga ativa mais influencia as perdas totais, sendo essas candidatas naturais a terem alocação de ativo. Essas barras formam o conjunto Φ_1 de barras candidatas à alocação de GD.

(ii) Através das Perdas Incrementais por barras (S_i), obtidas de um fluxo de carga convergido tal qual RODRIGUES (2007) :

$$S_i = \frac{\partial LO}{\partial Pd_i}, \quad i=1,\dots,nb \quad (22)$$

As barras, cujos valores positivos de sensibilidade são elevados, indicam que nelas há maior impacto nas perdas para variações de carga. Ou seja, para carga pesada, por exemplo, são as barras mais susceptíveis de terem perdas reduzidas ao se diminuir a injeção de potência líquida pela inserção de GD. Essas barras formam o conjunto Φ_2 de barras candidatas à alocação de GD.

(iii) simular um FPO que minimize perdas, sendo que todas as barras geram potência ativa. Como a função objetivo é minimizar as perdas, espera-se que se despachem apenas algumas barras que respondam a essa função objetivo, assim as barras com maiores gerações seriam candidatas naturais: $\Phi_3 = \{\text{barras com maiores gerações}\}$.

De uma análise detalhada dos resultados, a ser apresentada no Capítulo VI, conclui-se que a união desses três conjuntos é o melhor conjunto de barras a terem alocação de GD, podendo ser utilizadas para restringir o campo de busca.

4.6. Codificação dos Indivíduos

Os Algoritmos Genéticos requerem que indivíduos sejam codificados para a solução do problema. Neste estudo, os indivíduos são do tipo binário, compostos por 2 partes.

A primeira parte é formada por um único bit que representa a potência da GD a ser alocada no sistema. Por exemplo, supõe-se que se deseja alocar valores de potência iguais a Pot_1 e Pot_2. Então, caso este bit corresponda a zero (0) então a potência alocada será de Pot_1 W. Já se este bit corresponder a um (1), então o valor da potência da GD será de Pot_2 W.

A segunda parte do indivíduo, conforme a Figura 25, que apresenta um exemplo de decodificação para um sistema de nb barras, formada por bits que, convertidos para decimal, correspondem aos índices que referenciam as barras candidatas a receberem uma GD. Como o conjunto de barras candidatas pode ser inferior ao número total de barras do sistema, ocorre a indexação dessas barras, em ordem crescente de um até o número total de barras, tornando o problema mais simples, uma vez que barras fora do conjunto candidatas são facilmente identificadas. A quantidade de bits necessários para esta segunda parte depende do tamanho do sistema a ser simulado ou do número total de barras candidatas, ou seja, pode variar desde o total de barras do sistema, exceto a barra correspondente a subestação (SE), até um conjunto de candidatas restrito pelos critérios de sensibilidade estudados.



Figura 25 – Decodificação da Barra para uma GD

Para facilitar o entendimento da codificação, a Figura 26 apresenta um exemplo de solução ou indivíduo para um sistema de 70 barras, com possibilidade de alocação de equipamentos em todas as barras do sistema. Optou-se pela instalação de 3 equipamentos de GD considerando que, normalmente tais

equipamentos já estão determinados pelo cliente candidato a acessante. Ou seja, não há necessidade de representar a possibilidade de não-alocação no indivíduo.

A decodificação do indivíduo representado, ou seja, uma solução para o problema, está apresentada na Figura 26.

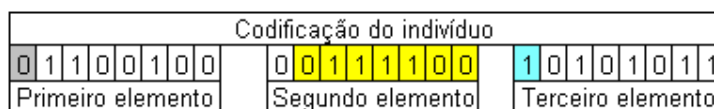


Figura 26 – Exemplo de decodificação de um indivíduo

Os valores da Tabela 4.4 correspondem à decodificação de um indivíduo. O primeiro bit do primeiro elemento, representado pela segunda linha da tabela apresenta o valor 0 (zero), ou seja, corresponde a uma potência de Pot_1 W. Já o bit representado na linha seguinte é igual a 1, correspondendo a uma potência de Pot_2 W do terceiro elemento do indivíduo. Nas linhas 3 a 5 tem-se decodificado os índices que correspondem a determinadas barras do sistema.

Tabela 4.4 – Exemplo de decodificação de um indivíduo

Equipamento	Bits do Exemplo	Solução
GD	0	GD = 100kW
GD	1	GD = 200kW
1º GD	1 1 0 0 1 0 0	100
2º GD	0 1 1 1 1 0 0	60
3º GD	0 1 0 1 0 1 1	43

O segundo índice decodificado corresponde a 60, que indica uma barra à qual está associado. Já a primeira solução, 100, extrapola o limite do conjunto de candidatas que é 69 (70 barras totais menos a SE). Assim, convencionou-se que para indivíduos a partir do valor 70, atribui-se um valor de função objetivo muito grande (10^{12} , por exemplo). Assim, ao se deparar com este tipo de situação os AGs aprendem que somente devem ser escolhidos indivíduos cujo resultado decodificado esteja dentro do número de barras candidatas possível.

Caso o número de candidatas seja inferior ao número total de barras, como por exemplo 20% do total de barras, o mesmo ocorrerá para os valores de índices que extrapolem o número de candidatas.

No caso do indivíduo cuja codificação seja igual a zero, ou seja, todos os bits das posições correspondentes ao número da barra sejam iguais a zero, o mesmo valor (10^{12}) é atribuído para a função objetivo deste indivíduo, pois não se quer ter a opção de não alocação de GDs.

4.7. Memória

SZUVOVIVSKI (2008) propõe que a memória deve ser introduzida na metodologia com a finalidade de acelerar a convergência do processo iterativo controlado pelos AG. A sua idéia principal é relativamente simples: memorizar soluções já avaliadas com os valores da FO já calculadas para evitar a repetição dos cálculos, evitando assim, um esforço computacional desnecessário.

Ressalta-se, entretanto, que são memorizadas as soluções decodificadas e já avaliadas e não os indivíduos, pois, analisando o processo de decodificação, nota-se que diferentes indivíduos podem gerar uma mesma solução.

Quanto mais soluções são testadas mais resultados são armazenados na memória e, por consequência, nas próximas gerações mais resultados são encontrados na memória, de forma a acelerar o processo de convergência dos AG.

4.8. Parâmetros dos AG

As principais características dos AG juntamente com a configuração dos seus parâmetros usados na metodologia desenvolvida estão contidas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Configuração dos AG

Característica	Parâmetro	Configurado
Indivíduo	Codificação	Binária
	Número de <i>Bits</i>	Depende das Opções ¹
População	Tamanho	28 Indivíduos
	Inicial	Aleatória
Seleção	Elitismo	2 Indivíduos
	Método	Roleta
Cruzamento	Tipo	Disperso
	Taxa	70%
Mutação	Tipo	Uniforme
	Taxa	5%
Parada	Critério	10.000 Gerações

4.9. Validação da Metodologia de Alocação

Para se validar a metodologia para determinadas condições de simulação, todos os indivíduos possíveis são gerados e avaliados um a um de forma que, no final, é possível conhecer a melhor solução para o sistema e condições em estudo.

A validação é utilizada para sistemas pequenos ou com poucas opções que resultem em um indivíduo relativamente curto, pois se compara a melhor solução da validação com a solução encontrada pela metodologia de alocação baseada nos AGs a fim de validá-la, para, só então, utilizar a metodologia de alocação em sistemas reais.

Também é possível utilizar a validação em sistemas completos, ou seja, considerando todas as barras do mesmo. Porém, a avaliação de cada indivíduo tornaria o processo muito mais demorado do que a própria metodologia de alocação que converge para a melhor solução através dos AGs sem precisar avaliar todos os indivíduos possíveis para se chegar à melhor solução.

4.10. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a formulação matemática do problema de otimização que envolve a alocação de GD em sistemas de distribuição utilizando AGs.

Esse problema de otimização envolve a minimização das perdas, das violações de tensão, das quedas de tensão e dos custos de conexão das GDs.

A metodologia adotada para solução do fluxo de potência foi o Fluxo de Potência Ótimo com uso do Método dos Pontos Interiores.

A análise de sensibilidade para restringir o campo de busca dos AGs adotada foi apresentada para redução do custo computacional, baseada na aplicação dos multiplicadores de Lagrange, das Perdas Incrementais e, finalmente permitindo geração em todas as barras, selecionando, para cada um dos casos, as barras com os maiores valores em módulo.

O sistema trabalha com indivíduos binários, representando a potência da GD e o índice correspondente à barra onde esta deve ser alocada.

O uso da memória desenvolvida por SZUVOVIVSKI, 2008, permitiu também um ganho referente ao custo computacional uma vez que o número de processamentos do FPO foi reduzido, pois os indivíduos já testados e armazenados na memória não necessitam novamente passar pelo processamento do FPO.

A seguir, serão apresentados os resultados referentes a essa modelagem matemática.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia desenvolvida e aplicada em um sistema de 70 barras.

Conforme descrito no Capítulo 4, nas seções 4.1 a 4.4, os objetivos a serem minimizados para escolha do melhor ponto para a conexão de uma GD são:

- Custo das Perdas;
- Custo da Redução de Queda de Tensão;
- Custo da Violação de Limites de Tensão;
- Custo de Conexão;

Uma primeira consideração diz respeito ao tempo demandado para as simulações. Nas primeiras realizadas verificou-se que o tempo total para convergência era da ordem de 4 horas, utilizando-se o hardware do tipo Notebook da Thoshiba com processador Pentium de 1,73 GHz com 500 MB de memória RAM, tendo o Microsoft Windows XP como sistema operacional e usando o Matlab Versão 7.2.0.232 (R2006a) e o *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox* Versão 2.0.1 como plataforma da metodologia desenvolvida.

O desenvolvimento da ferramenta de análise de sensibilidade, representada pelos conjuntos Φ_1 , Φ_2 e Φ_3 , permitiu que este tempo se reduzisse para aproximadamente 30 minutos no que se refere ao processamento dos AGs.

O critério de parada utilizado para convergência do processo foi o cômputo de 10000 gerações.

O custo de conexão foi representado de duas formas diferentes. Na primeira, seu valor foi considerado baixo, ou seja, o mesmo não foi relevante no processo de otimização a fim de enfatizar os aspectos elétricos envolvidos na conexão das GDs. Já na segunda forma, seu valor foi considerado alto. Desta forma, o custo de conexão assume uma principal relevância dentre as outras FOs, permitindo uma comparação entre os resultados.

As GDs foram despachadas em modo fixo, ou seja, gerando a potência equivalente ao limite máximo permitido pelo gerador. Este tipo de despacho visa atender a solicitação do cliente quanto à geração máxima de energia permitida pelo equipamento instalado.

Para estudo de planejamento é importante verificar a inserção de fonte de GD num horizonte de tempo de até cinco anos. Assim, disponibilizando-se duas opções de patamar de carga (pesada e leve), apenas para dias úteis de semana ao longo de 5 anos, obtêm-se 10 patamares de carga.

As tensões na saída da subestação que alimenta a rede de distribuição foram fixadas em 0,9928 pu para carga pesada e 0,9565 pu para carga leve, conforme recomendações do ONS.

Para apresentação dos resultados acerca de todos os objetivos propostos neste trabalho, os mesmos foram divididos nos seguintes itens:

- 1) Análise de sensibilidade para determinação do conjunto de barras candidatas para redução do campo de busca;
- 2) Simulação do sistema original, ou seja, desconsiderando a alocação das unidades de GD;
- 3) Simulações do sistema completo, considerando as alocações de GD fornecidas pelos Algoritmos Genéticos, utilizando-se 2 patamares de custo de conexão (alto e baixo).

O sistema utilizado para análise das metodologias foi o de 70 barras, apresentado na Figura 27, onde a barra 1 é a barra da SE e cujos dados das potências ativas e reativas demandadas em cada barra e de impedância das linhas estão apresentados no Anexo B (BARAN e WU, 1989).

O sistema tem carga total igual 3.812,19 kW a potência base utilizada foi de 1000 kVA.

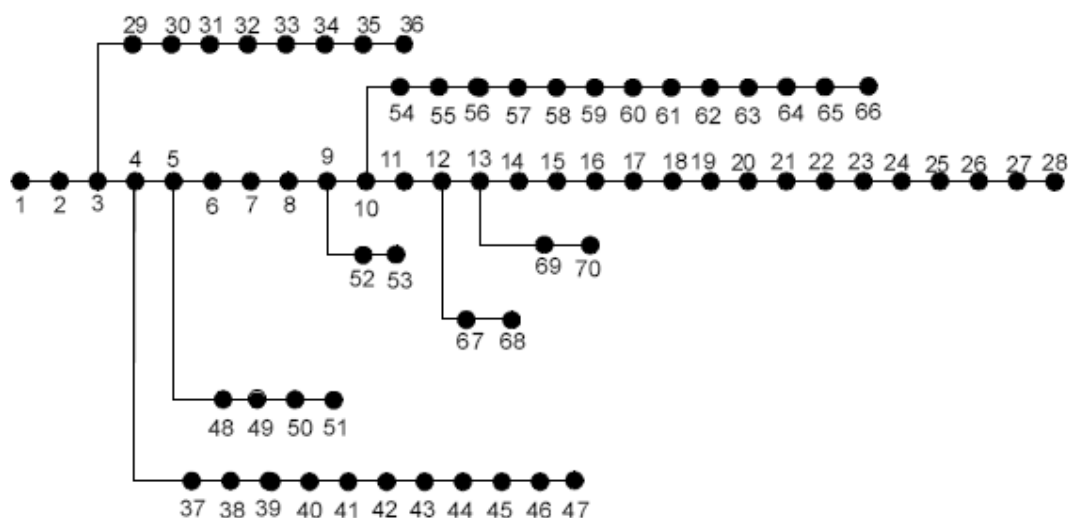


Figura 27 – Sistema de 70 barras (Baran e Wu, 1989)

5.1. Análise de sensibilidade para redução do campo de busca

Os conjuntos $\Phi 1$, representando as barras selecionadas pelo critério S_i ; $\Phi 2$, representando as barras selecionadas pelo critério λ_p e, finalmente $\Phi 3$ que contém as barras obtidas pelas máximas potências geradas, foram obtidos através de simulações do FPO – MPI, sem inserção de GDs, minimizando-se as perdas totais da rede. Para o estudo em questão foi estabelecido que cada conjunto de barras candidatas correspondesse a 20% do número total de barras.'

Assim, os 14 maiores valores de cada um dos conjuntos $\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$ foram ordenados em ordem crescente, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores dos conjuntos de candidatas em ordem crescente

$\Phi 1$		$\Phi 2$		$\Phi 3$	
Barra	λ_p	Barra	S_i	Barra	P_{gd}
24	1,0846	22	1,6089	12	0,0782
25	1,0849	24	1,6090	13	0,1460
26	1,0853	25	1,6091	17	0,0452
27	1,0854	26	1,6093	18	0,0601
28	1,0855	27	1,6093	19	0,0597
58	1,1233	28	1,6093	22	0,1129
59	1,1495	59	1,6140	60	0,1059
60	1,1598	60	1,6177	61	0,0474
61	1,1722	61	1,6232	62	1,0000
62	1,1890	62	1,6206	63	0,2396
63	1,1897	63	1,6205	65	0,2271
64	1,1906	64	1,6204	66	0,0590
65	1,1950	65	1,6197	69	0,0280
66	1,1963	66	1,6195	70	0,0280

Ao comparar as simulações com e sem alocação de GDs a partir dos conjuntos $\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$, pode-se verificar que as perdas, para o patamar pesado sem GD, foram da ordem de 331,60kW enquanto que, ao alocar as unidades de GD nas barras do conjunto formado pela união dos três conjuntos apresentados, as perdas se reduziram para 228,24kW.

A alocação de GDs em barras não pertencentes aos conjuntos $\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$, resultou em perdas bem maiores, como pode ser observado na Tabela 5.2. Os conjuntos de barras 1 e 2 apresentam o mesmo número de barras do conjunto em teste ou conjunto união, no entanto as barras escolhidas são diferentes daquelas pertencentes ao conjunto em teste.

Para o conjunto 1 as perdas verificadas são muito piores que aquela obtida da simulação para o conjunto de barras candidatas. Já o conjunto 2, apesar de propiciar redução de perdas, esta ainda é bem inferior àquela obtida a partir do conjunto candidatas.

Tabela 5.2 – Comparação de perdas alocando fora do conjunto candidatas

Conjunto de Barras 1	Perdas (kW)	Conjunto de Barras 2	Perdas (kW)
2-7; 30-34; 45-47	346,7	7-11; 32; 33; 35-37; 50-53	302,42

Ao se estabelecer um comparativo entre os perfis de tensão verificados pelos três conjuntos ($\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$), com aqueles obtidos no caso original para o patamar pesado, ou seja, sem introdução de GDs, temos os seguintes resultados na Tabela 5.3, para as barras que apresentavam tensões inferiores àqueles determinados pela ANEEL.

Tabela 5.3 – Comparação valores das tensões caso original e conjuntos simulados (valores em pu)

BARRA	ORIGINAL	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$
59	0,9137	0,9297	0,9298	0,9298
60	0,9089	0,9261	0,9261	0,9262
61	0,9033	0,9219	0,9218	0,9218
62	0,8951	0,9156	0,9157	0,9157
63	0,8948	0,9154	0,9154	0,9154
64	0,8943	0,9151	0,9151	0,9151
65	0,8922	0,9139	0,9139	0,9136
66	0,8916	0,9145	0,9144	0,9142

Segundo a Tabela 5.3, houve uma melhora significativa no perfil de tensão com a introdução das GDs nos postos de cada conjunto em análise.

Da mesma forma, comparando-se os fluxos de potência aparente calculados para cada um dos conjuntos com inserção de GD com aqueles verificados no caso original, tomando como base os fluxos que apresentavam valores acima de 1 pu, tem-se a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Comparativo entre os fluxos das simulações com e sem GD (pu).

DE	PARA	ORIGINAL	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$
1	2	5,2744	4,5775	4,5777	4,5775
2	3	5,2743	4,5774	4,5776	4,5774
3	4	5,1553	4,4585	4,4585	4,4585
4	5	4,9138	4,2170	4,2170	4,2170
5	6	3,8072	3,1104	3,1103	3,1103
57	58	2,3221	1,6653	1,6653	1,6653
58	59	2,2487	1,6174	1,6174	1,6174
59	60	2,2126	1,5937	1,5938	1,5937
60	61	2,0685	1,4546	1,4546	1,4546
61	62	2,0527	1,4445	1,4445	1,4448

Segundo a Tabela 5.4 houve uma diminuição significativa na sobrecarga dos alimentadores com a introdução das GDs nos pontos de cada conjunto em análise.

Após obter os resultados de cada um dos conjuntos individualmente, procedeu-se a combinação deles da seguinte maneira:

- 1) União entre as candidatas dos três conjuntos ($\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$);
- 2) Interseção, dois a dois, dos conjuntos ($\Phi 1$ e $\Phi 2$, $\Phi 1$ e $\Phi 3$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$).

Tal combinação foi motivada pela necessidade de determinar qual seria a melhor maneira de reduzir o campo de busca, objetivando a redução do custo computacional. Sendo assim, a união entre os três conjuntos apresentou melhor resultado, ainda que com uma diferença de apenas 3,95% em relação à intersecção entre eles.

Assim, a união dos conjuntos $\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$, restringe a busca, neste caso, a menos da metade das barras existentes na rede, tornando o tempo computacional requerido para solução do problema de otimização, bem menor.

Do ponto de vista do custo computacional temos que, ao simular o sistema proposto sem análise de sensibilidade, o tempo total até a convergência era de 4 horas. Ao se introduzir a análise de sensibilidade este custo se reduziu para cerca

de 30 min., mantidas as características o hardware utilizado. Simulações em computadores mais novos obtiveram a convergência em 10,4min.

Como forma de validação do algoritmo desenvolvido, foi simulado o sistema de 70 barras com auxílio dos Algoritmos Genéticos (AG) para determinação dos pontos de alocação ótimos das GDs, alocando-se 3 unidades com potências iguais a $Pot_1=100\text{ kW}$ e/ou $Pot_2=200\text{ kW}$.

A solução do problema nas condições apresentadas foi a conexão das GDs nas barras 62, 63 e 66 com potências iguais a 200 kW cada, obtendo-se uma perda total de 234,60 kW. A solução final corresponde às candidatas obtidas pela união de $\Phi 1$, $\Phi 2$ e $\Phi 3$.

Assim, das análises de sensibilidade realizadas, concluiu-se que a união dos conjuntos: $\Phi 1$ (formado pelos maiores multiplicadores de Lagrange relacionados ao problema de otimização); $\Phi 2$ (formado pelas maiores perdas incrementais) e $\Phi 3$ (formado pelos maiores despachos de GDs), contemplam as barras ótimas do problema.

Desse modo, ao invés de se procurar o melhor ponto de conexão de GDs por todo o universo de barras consegue-se diminuir o campo de busca para menos da metade, o que para redes reais é de grande relevância em termos de ganhos computacionais.

5.2. Simulações do Sistema

A fim de se avaliar as melhorias no sistema pela inserção das GDs, utilizou-se o modelo de 70 barras, inicialmente sem alocação de qualquer GD. Todos os resultados desta simulação foram comparados com os demais, permitindo-se a alocação de 3 unidades de GD.

No caso original foi feito a aplicação do FPO para os patamares de carga leve e pesada (Apêndice B), sendo que a única fonte de geração é a subestação, que

injeta uma potência de $3,9863 + 2,7828 j$ pu para carga pesada. O valor de perda ativa total foi de 0,3316 pu.

Permitiu-se a alocação de 3 unidades com potências nominais iguais a $Pot_1=100$ kW e/ou $Pot_2=200$ kW, supondo-se dois casos: (i) Custo de Conexão Baixo, e (ii) Custo de Conexão Elevado.

(i) Custo de Conexão Baixo

Considerou-se o custo de conexão da ordem de $1E+5$, multiplicando-se pela distância em km entre a unidade de GD e a barra em teste. Nessa situação, foram alocadas 3 unidades de GD com potências de 200 kW nas barras 62, 63 e 66.

A Figura 28 compara os valores de magnitude de tensão para o sistema nas configurações: original (sem GD) e com alocação de GDs para o patamar leve.

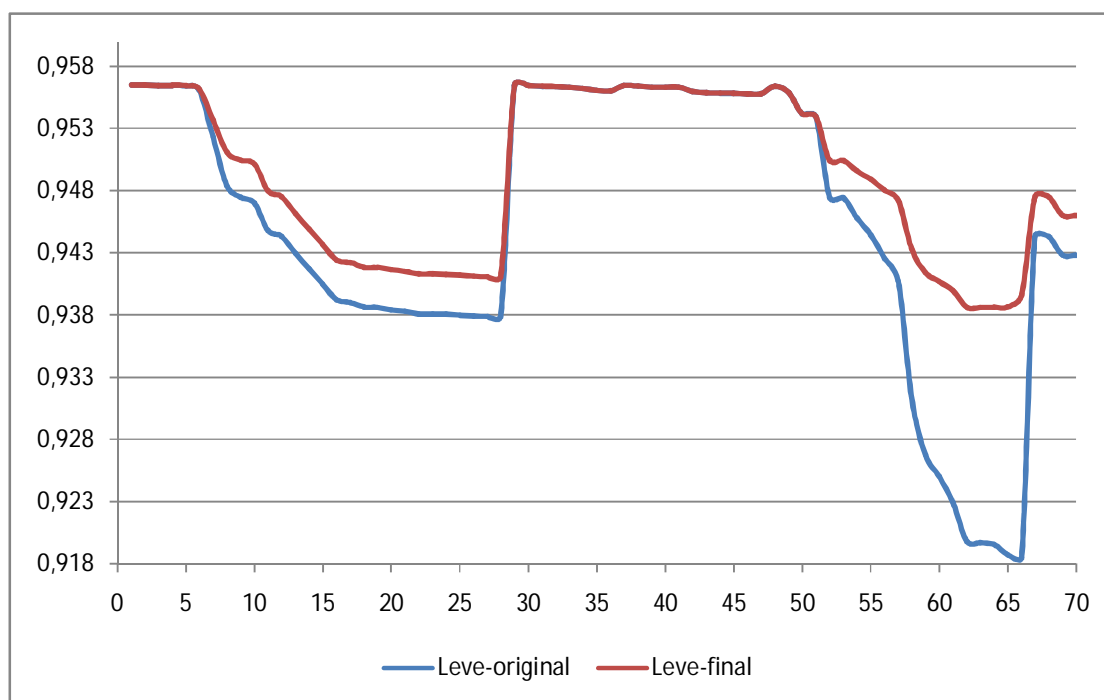


Figura 28 – Gráfico das tensões nas barras para o patamar leve, em pu

Como se pode verificar na Figura 28, as tensões no patamar leve apresentam grandes diferenças entre o valor original do sistema e com alocação de GD. Há melhoria no valor dos módulos de tensão, principalmente nas barras mais distantes

da SE. Tensões que antes apresentavam valores muito baixos sofreram acréscimo de 0,02pu.

Já para o patamar pesado, a Figura 29 apresenta o comportamento das tensões.

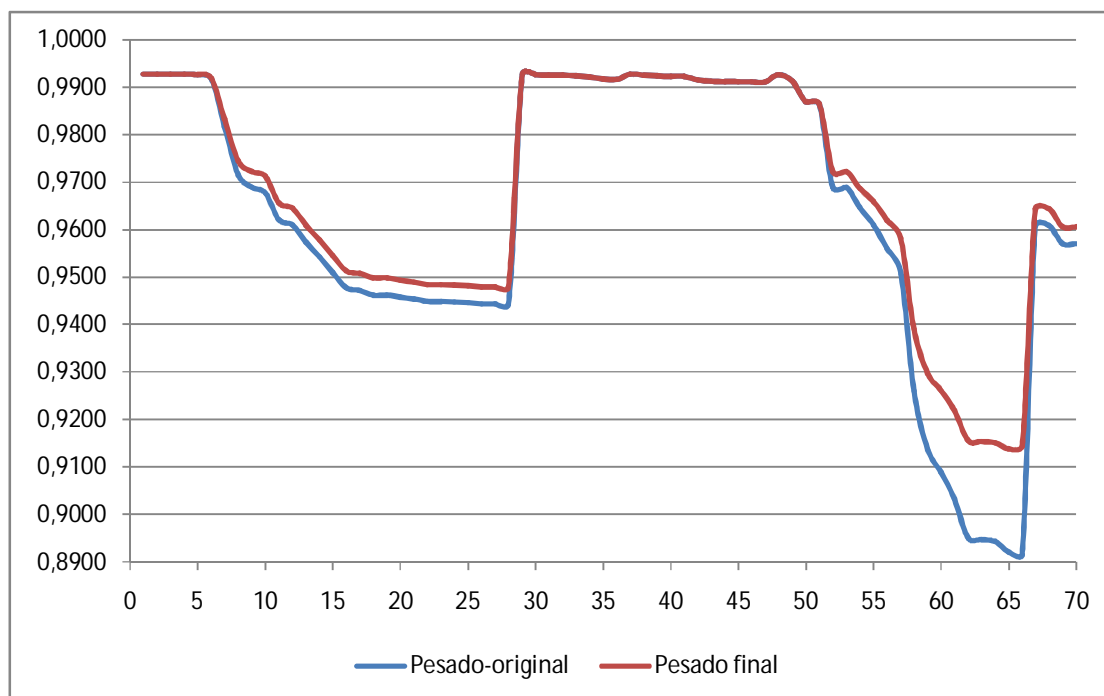


Figura 29 – Gráfico das tensões nas barras para o patamar pesado, em pu

Como se pode verificar na Figura 29, as tensões no patamar pesado apresentam grandes diferenças entre o valor original do sistema e com alocação de GD. Há melhoria no valor dos módulos de tensão, da ordem de 2,5%, principalmente nas barras mais distantes da SE.

Uma nova análise, agora dos fluxos de potência na rede apresentou os seguintes resultados, como podem ser verificados na Figura 30 e Figura 31.

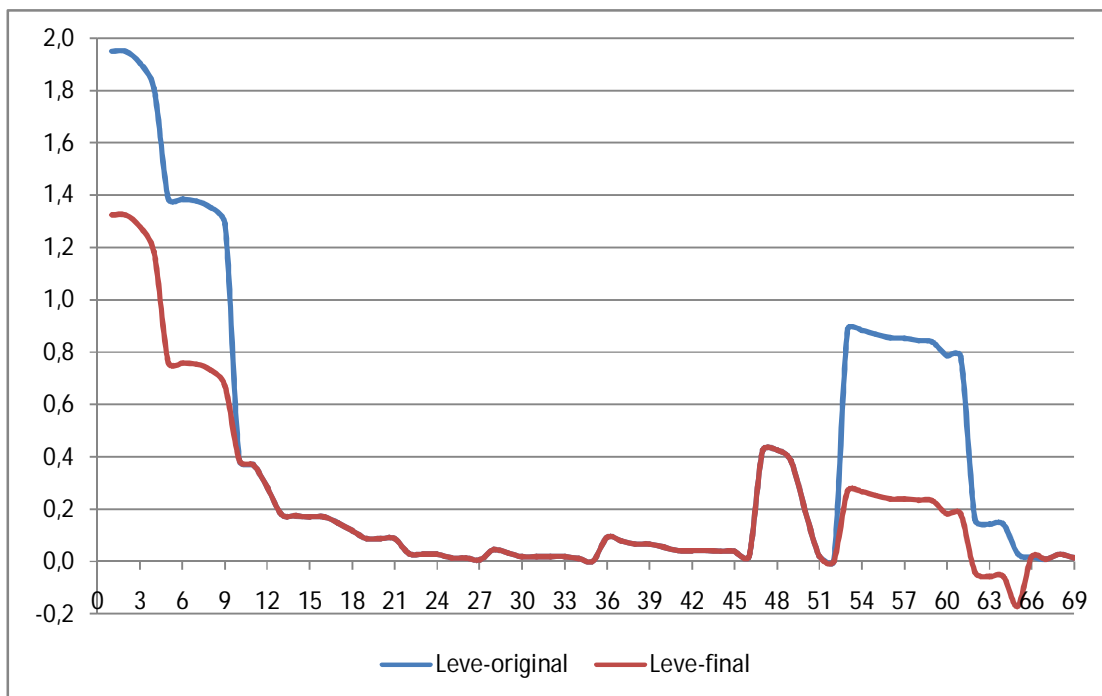


Figura 30 – Fluxos nas linhas do sistema em pu, patamar leve

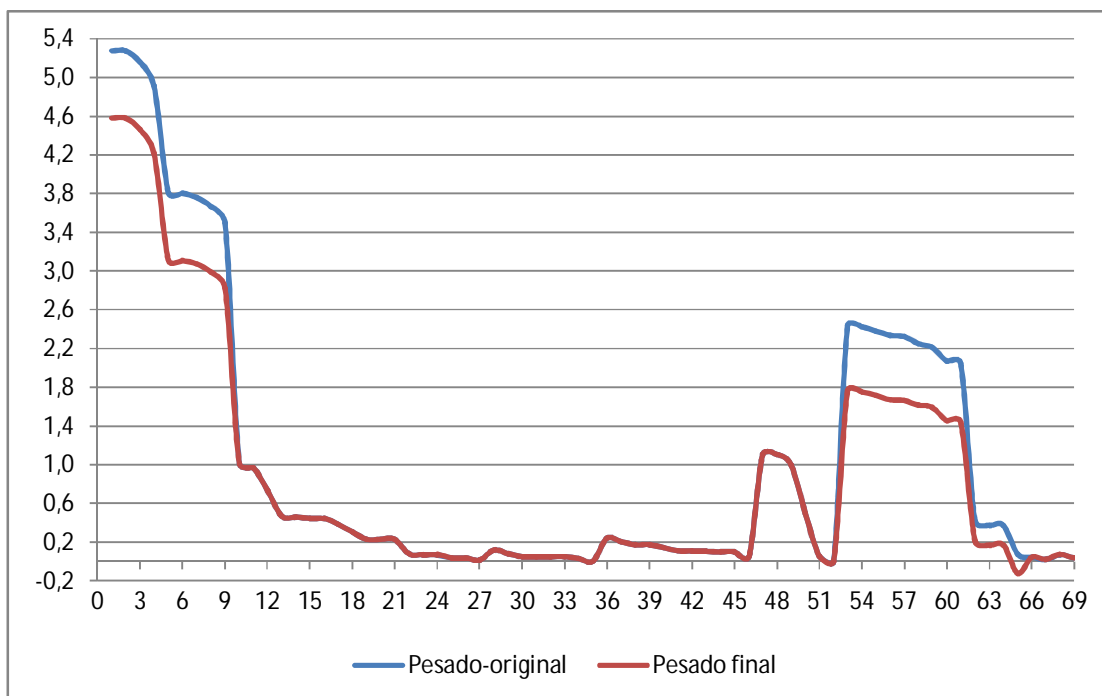


Figura 31 - Fluxos nas linhas do sistema em pu, patamar pesado

As correntes que circulam nas linhas do sistema são diretamente afetadas pela entrada das unidades geradoras. Isso se dá através da injeção de potência ativa que flui no circuito. As correntes podem ser tanto na direção SE - cargas,

quanto reversa, ou seja, na direção da carga para a SE. Estas últimas podem ser danosas uma vez que o sistema de proteção sofre interferência deste tipo ocorrência.

A redução do carregamento verificado na Figura 30 e Figura 31 demonstra que, caso alguns dos alimentadores, tanto do conjunto de barras de 1 a 9, quanto do conjunto de barras 53 a 65, estivessem sobrecarregados, estes seriam aliviados, o que pode auxiliar numa maior durabilidade destes elementos. Isso produz um impacto positivo para a concessionária uma vez que promove redução de custos de manutenção e/ou reposição de condutores.

Também se deve atentar para a questão da queda de tensão. Este evento é, em alguns casos, grande causador de queixas por parte dos consumidores tendo em vista a necessidade de suprimento de suas cargas. No âmbito residencial torna-se ainda mais complicado visto que, por se tratar de consumidores de pequeno porte, acabam por não ter a devida atenção nesta condição. Apesar dos constantes investimentos por parte das concessionárias em melhorias do sistema, ainda é grande o número de queixas devido à baixa tensão no final de alimentadores muito longos.

Na Figura 32 e Figura 33, tem-se o comportamento da queda de tensão para o alimentador em estudo, nos patamares leve e pesado, respectivamente.

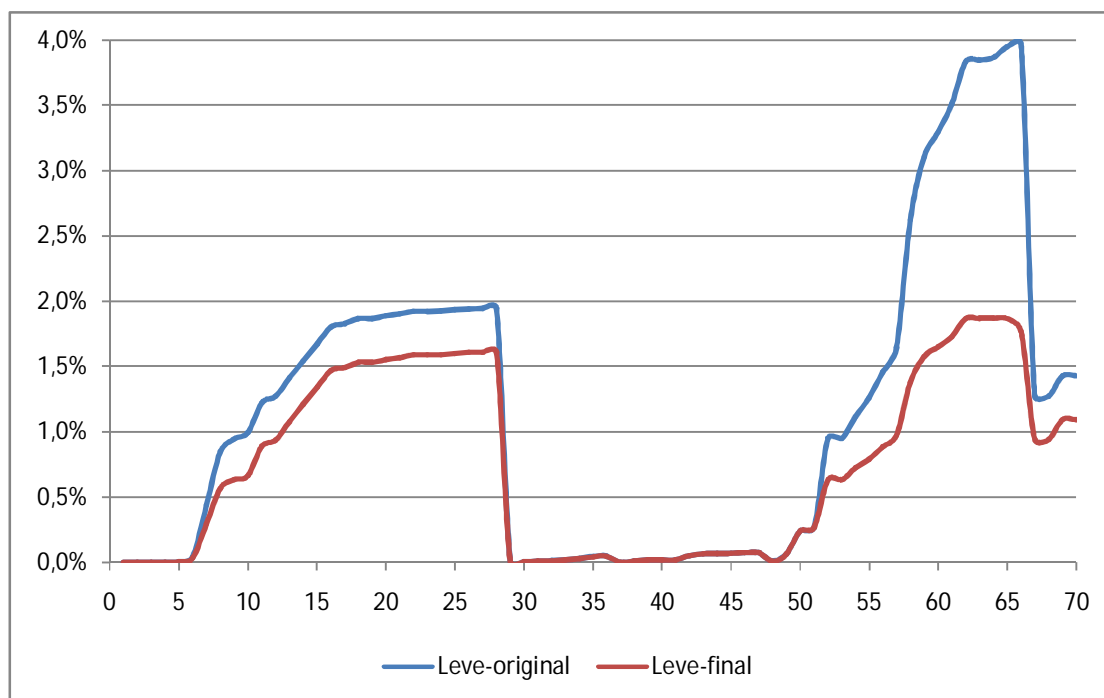


Figura 32 – Quedas de tensão percentual do sistema de 70 barras, patamar leve

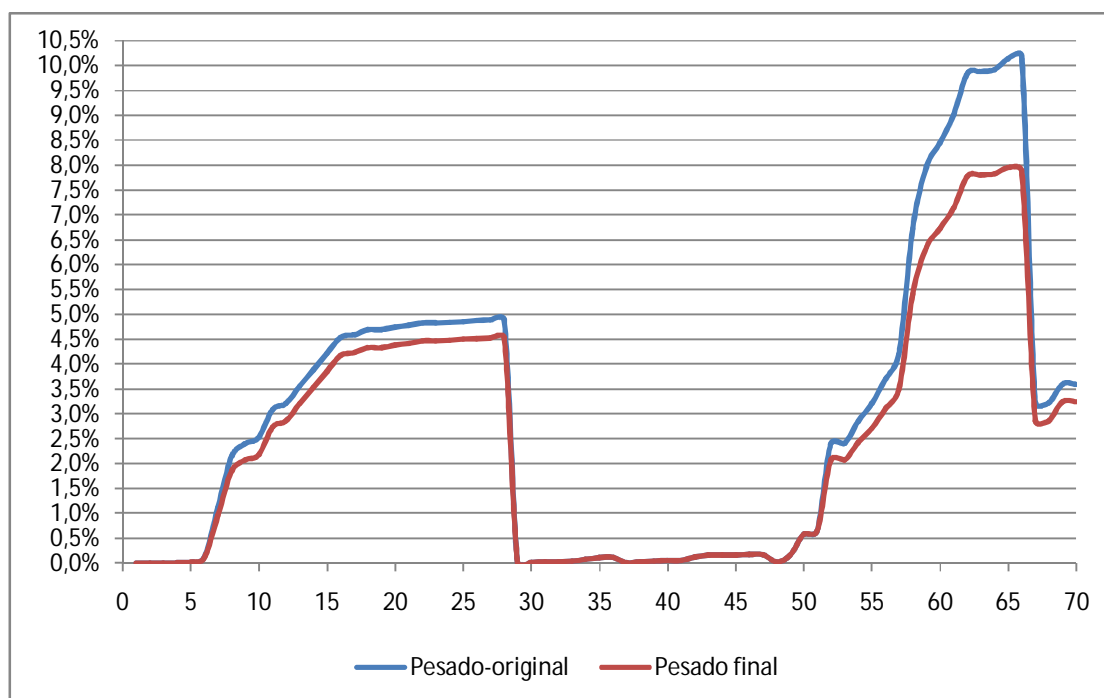


Figura 33 - Quedas de tensão percentual do sistema de 70 barras, patamar pesado

O benefício da alocação de fontes de geração distribuída é bastante evidente neste estudo. A redução verificada no início do alimentador é consequência da ação

das unidades de GD alocadas nas barras finais do mesmo. Como a quantidade demandada da SE é reduzida temos que o perfil das tensões melhora, reduzindo-se de 4%, no caso do patamar leve (Figura 32), para menos de 2,0%. Já o perfil das quedas de tensão para o patamar pesado demonstra uma melhora de 2% nos pontos onde a queda original era da ordem de 10%. Tal melhora ainda não é muito grande, pois os valores injetados de potência ativa são baixos.

Do ponto de vista das perdas no sistema, comparando-se os resultados das simulações antes e depois da alocação de GDs, pode-se verificar que estas foram reduzidas consideravelmente. Perdas que no sistema original eram da ordem de 0,3316 pu, passaram a 0,2346 pu no patamar pesado.

Tal redução das perdas é muito relevante. Os resultados são bastante expressivos, uma vez que qualquer redução de perdas propiciada ao sistema de distribuição de energia elétrica produz uma economia muito grande para o mesmo.

Os custos associados a cada um dos estudos realizados estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Custos comparados para os sistemas sem e com GD

Custo Original	Custo Final
Sem GD	Com GD
(Milhões R\$)	(Milhões R\$)
2.370	1.660

(ii) Custo de Conexão Elevado

Ao se atribuir um custo elevado para a conexão da GD ao sistema de distribuição, da ordem de $1E+08$ unidades monetárias, as barras escolhidas para alocação foram aquelas mais próximas às GDs.

Na Figura 34, tem-se a disposição do sistema de 70 barras, sendo que os asteriscos azuis representam as barras, o vermelho a localização da GD1, o verde a GD2 e o preto a GD3.

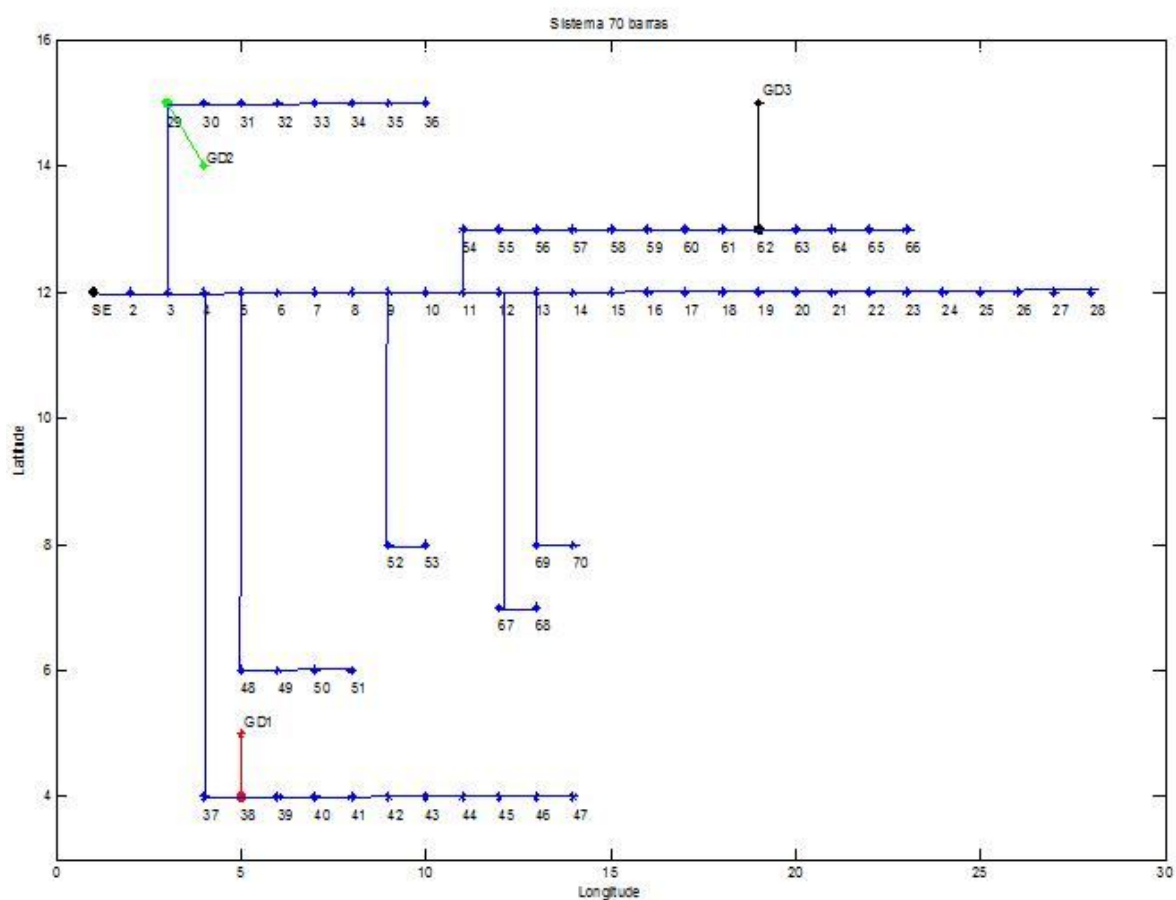


Figura 34 – Sistema 70 barras com alocação de GDs

As barras escolhidas para alocação foram as de número 38, 29 e 62, que justamente estão mais próximas das GDs, comprovando que o custo de conexão foi considerado e que as barras mais próximas foram escolhidas.

Salienta-se a alocação na barra de número 62, também escolhida no estudo anterior, que comprova que, apesar de haver outras barras com distâncias semelhantes ou inferiores, o sistema busca a melhor barra do ponto de vista elétrico, preferindo uma barra mais representativa dentro do ponto de vista de benefícios à rede.

O custo total para este caso foi de 3,67 E+9 unidades monetárias. Este custo é muito mais alto que aquele obtido quando os custos de conexão foram mais baixos.

As perdas foram da ordem de 0,282 pu para esta condição onde o custo de conexão é elevado. Apesar das perdas serem inferiores ao valor original, o custo total foi dominado pelo custo de conexão, conduzindo ao valor verificado.

A seguir estão apresentados os resultados para esta simulação, do ponto de vista das tensões, das quedas de tensão e fluxos nas linhas, para ambos os patamares (leve e pesado).

As Figura 35 e Figura 36 apresentam o comparativo entre os módulos das tensões nas barras do sistema quando da escolha das barras candidatas, considerando um alto custo de conexão para os patamares leve e pesado.

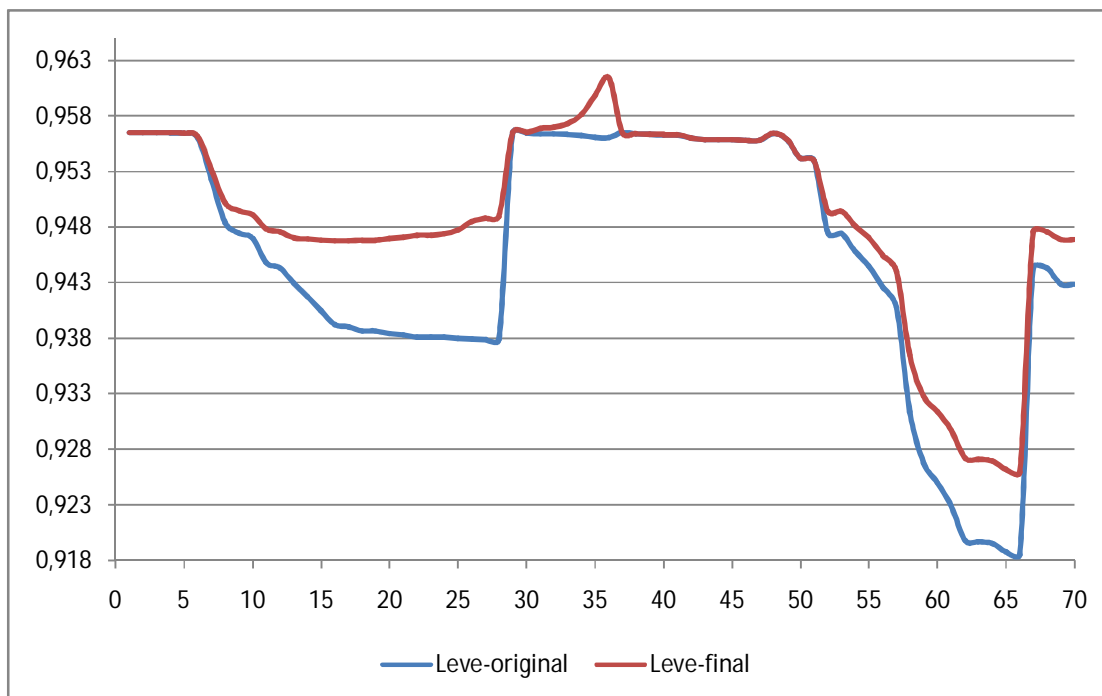


Figura 35 – Tensões patamar leve, considerando alto custo de conexão

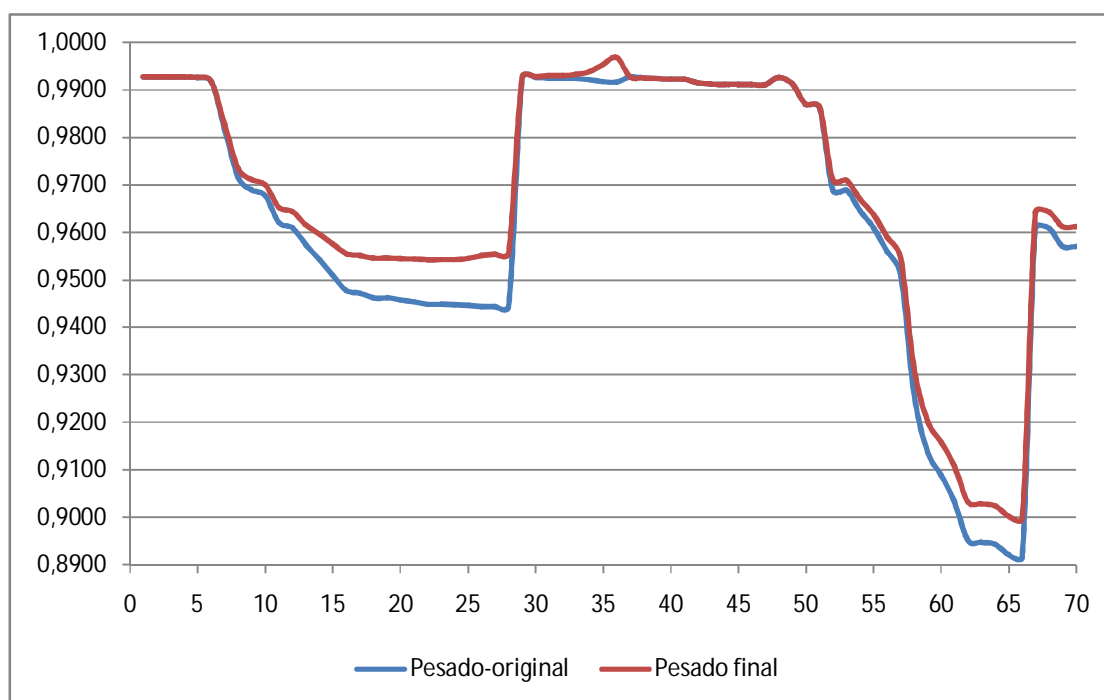


Figura 36 - Tensões patamar pesado, considerando alto custo de conexão

Houve uma melhora sensível quanto aos valores em módulo das tensões para esta simulação. As barras entre 10 a 30 apresentaram pequena melhora para o patamar pesado, no entanto para o patamar leve esta melhora foi considerável, da ordem de 6,5%, enquanto que para o patamar pesado, esta melhora foi de menos que 1% no módulo das tensões das barras 57 a 66.

Para o patamar pesado temos que a melhora foi pequena, mantendo as tensões abaixo do limite crítico.

Já do ponto de vista dos fluxos, a Figura 37 e Figura 38 apresentam os resultados para esta simulação.

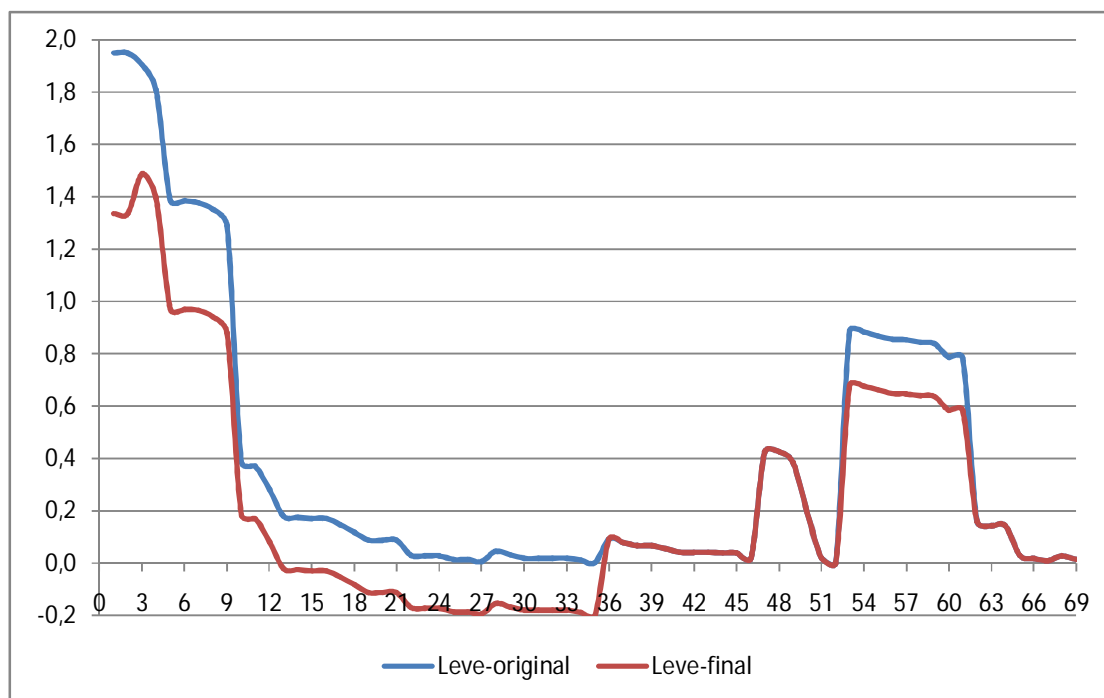


Figura 37 – Fluxos nas linhas do sistema em teste, patamar leve, custo conexão alto

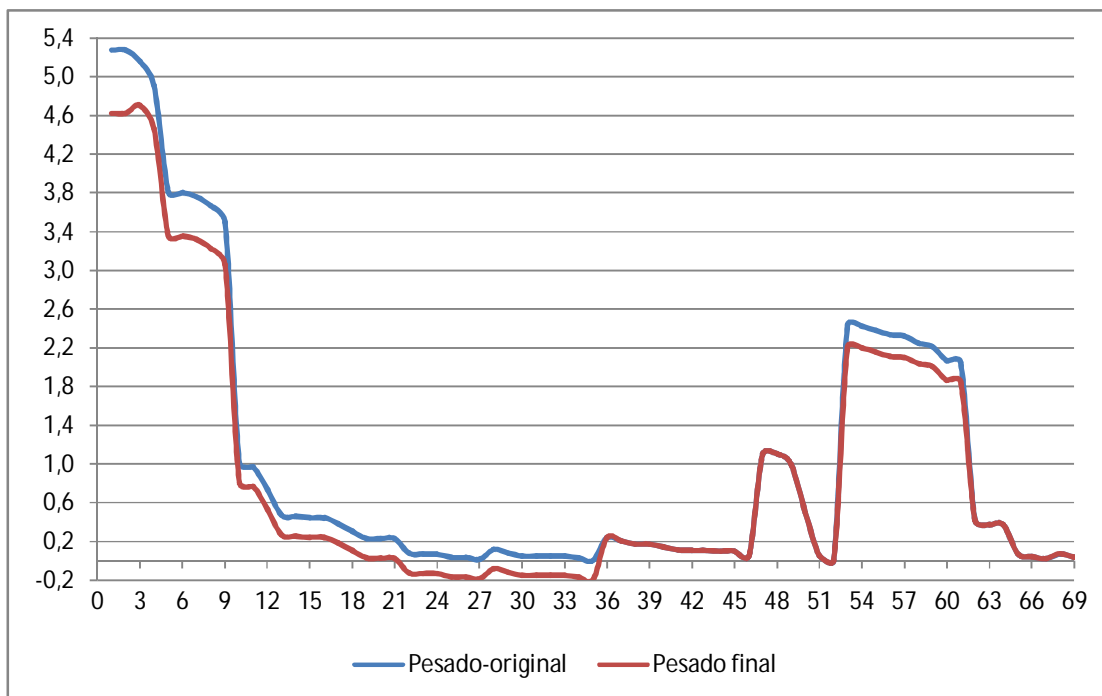


Figura 38 – Fluxos nas linhas do sistema em teste, patamar pesado, custo conexão alto

Como se pode observar ocorreu uma redução nos fluxos nas linhas de 1 a 9 e de 52 a 62 para ambos os patamares. Isso se deve à alocação das unidades de GD que permitiram um “alívio” das mesmas, podendo representar, caso estas estivessem sobrecarregadas, um benefício para manutenção das condições de operação do alimentador e, ainda, redução de custos para a concessionária, uma vez que os custos de manutenção de tais linhas poderiam ser reduzidos.

Entre as barras 10 e 35 ocorreu um fluxo reverso no sistema para o patamar leve, ocasionado pelo posicionamento de unidades de GD nesta região. Tal fato comprova a possibilidade de ocorrência de fluxos reversos nas linhas, justificando a necessidade de estudos relativos à ocorrência deste tipo de fluxo no sistema.

Já no patamar pesado o fluxo reverso só ocorreu entre as barras 22 e 35, sendo este de pequena monta. Isso se deve a ocorrência de cargas maiores durante este período. Por se tratar de um sistema em teste conclui-se que tal redução pode propiciar um “alívio” para a rede, aumentando a vida útil de condutores e acessórios, além de outros equipamentos existentes ao longo de uma linha de distribuição.

As quedas de tensão para esta simulação estão representadas Figura 39 e Figura 40.

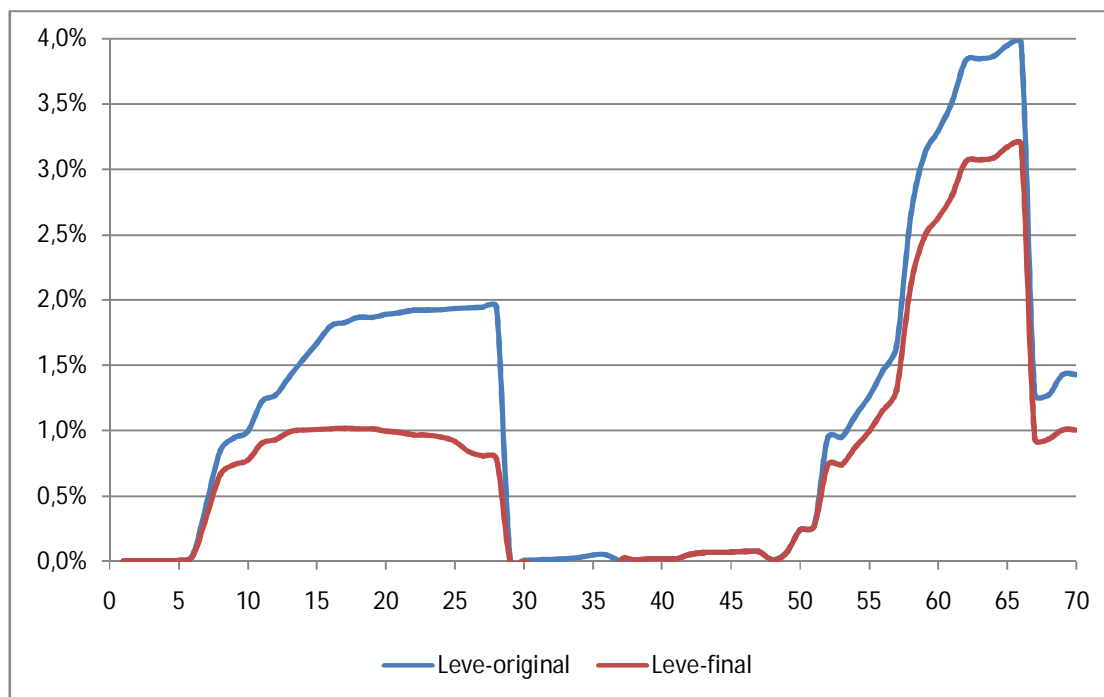


Figura 39 – Quedas de tensão no sistema, patamar leve, custo de conexão elevado

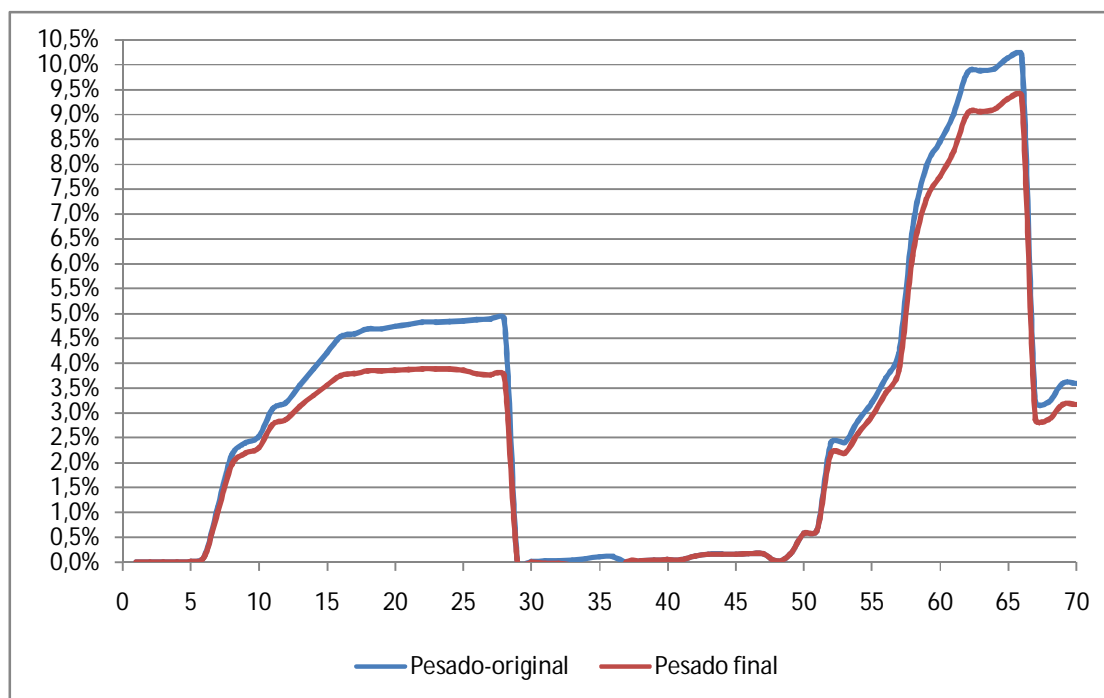


Figura 40 – Quedas de tensão no sistema, patamar pesado, custo de conexão elevado

Assim como no caso anterior, onde o custo de conexão foi considerado baixo, nesta situação também há a redução das quedas de tensão. No entanto os montantes são bem inferiores àqueles observados na primeira simulação.

As barras 15 a 28, que antes ultrapassavam os limites de 4%, para o patamar pesado, estabelecidos pelo ONS, agora foram conduzidas para dentro deste limite, promovendo uma melhora significativa. Tal melhora se deve ao fato da alocação de uma GD próxima a estas barras. Já nas barras 57 a 65, também houve uma melhora, inferior àquela observada na primeira simulação, mas que não conseguiu reduzir a questão da violação de limites. Talvez, com a alocação de unidades de GD com maior porte, tais melhorias fossem ainda mais eficientes, não mais infringindo os limites determinados pela ANEEL.

5.3. Considerações finais

A redução dos custos nos sistemas com alocação de GD fica evidente neste estudo. Como há uma redução em todas as variáveis analisadas, ou seja, Custo Perdas, Custo Queda de Tensão, Custo Violação de Limites de Fluxo e Custo para Conexão da GD então se pode concluir que o objetivo desta ferramenta é atingido e a mesma pode ser aplicada para auxiliar no planejamento de sistemas de potência.

A simulação com um campo de busca menor, como o proposto, leva ao mesmo resultado obtido pelo conjunto composto por todas as barras. Salienta-se ainda, que as barras alocadas (62,63 e 66), escolhidas para o patamar pesado, fazem parte do conjunto de barras candidatas obtidas pela análise de sensibilidade, o que corrobora esse estudo.

O custo de conexão é aquele que deve restringir o campo de busca de forma efetiva, pois considera uma restrição física, associada à distância que instalações de linhas de distribuição e transmissão devem percorrer para acessar a rede existente.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

O uso de algoritmos computacionais para determinação de ponto de alocação ótima para unidades de Geração Distribuída (GD) apresentou resultados muito expressivos no auxílio ao planejamento e operação de sistemas elétricos.

Visando varrer todo ou parte do espectro de um determinado alimentador, fez-se uso de ferramenta de inteligência artificial com aplicação de Algoritmos Genéticos (AG). Os critérios adotados para a aplicação desta ferramenta são bastante eficazes, pois permite explorar ao máximo o campo de busca, alcançando soluções de problemas como o que se estudou.

A metodologia para diminuir o campo de busca de um problema de otimização, que tem como objetivo alocar GDs em redes de distribuição foi proposta e os resultados apresentados foram pertinentes.

As simulações apresentaram resultados bastante conclusivos quanto aos benefícios para o sistema quando se considera a entrada de unidades de GD, alocadas segundo vários objetivos.

Foram consideradas unidades de GD com potência de 100 kW e 200 kW, onde a ferramenta testou ambas as possibilidades para cada uma das barras do sistema, resultando na escolha final apresentada. Apesar de serem potências baixas, o montante total de potência injetada no sistema de 70 barras foi suficiente para produzir os resultados que demonstram o grande potencial da aplicação de Geração Distribuída no sistema.

O objetivo principal do programa foi atingido que é a minimização do custo total que considera quatro parcelas: Custo de perdas, Custo de conexão, Custo de Queda de tensão e Custo de violação de limites de fluxo.

Como o montante de perdas no sistema é considerado grande, tem-se que seu custo acaba por ser o predominante. Para minimizar a disparidade entre as

unidades de cada custo, procedeu-se a normalização das funções, conduzindo todos a valores bem mais próximos um dos outros.

Quanto aos enfoques estudados, a instalação de GDs só apresentou vantagens, no entanto, sugere-se como estudos futuros, complementação dessa análise, versando sobre as conhecidas desvantagens das GDs tais como : proteção, estabilidade da rede, suporte de reativo, fluxo reverso, recondutoramento do alimentador, harmônicas.

Quanto a trabalhos futuros propõe-se:

- expandir essa metodologia para que se faça também escolha das tecnologias de GDs e dimensão das mesmas;
- consideração de estudos de correntes de curto-circuito;
- exploração do despacho de potência reativa das GDs;
- re-alocação de banco de capacitores e ou reguladores anteriormente instalados;
- utilização de outras técnicas de inteligência artificial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, N., MAHAT, P., MITHULANANTHAN, N., **An analytical approach for dg allocation in primary distribution network**; Electric Power & Energy Systems 28, Elsevier, pg 669-678, Fevereiro, 2006.
- ALINEJAD-BEROMI, Y et al, **Using genetic algorithm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile**, UPEC; 2007.
- ANEEL, **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**, Módulo 2, 2005.
- ANEEL, **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**, Módulo 8, 2007.
- ANEEL, **Disposições Relativas à Conformidade dos Níveis de Tensão de Energia Elétrica em Regime Permanente**, Resolução ANEEL N° 505. Brasília, 2001.
- ARRUDA, L.V.R. et al, **Um método evolucionário para sintonia de controladores PID em processos multivariáveis**, artigo submetido para publicação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006.
- BARAN, M.E.E., WU, F.F., **Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 725-734, 1989.
- BORBELY, A.M., KREIDER, J.F., **Distributed Generation: the power paradigm for the new millennium**, Ed. CRC, 2001.
- BORGES, C. L. T., MACHADO JR., Z. S., FALCÃO, D. M., **Influência da alocação ótima de dispositivos de proteção e de geração distribuída na confiabilidade do sistema**. XVII SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 19-24, Outubro, 2003.
- BORGES, C.L.T., FALCÃO, D.M., **Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability , losses and voltage profile**”, IEEE Bologna PowerTech Conference, Junho, 2003.
- BROWN, R.E., **Impact of smart grid on distribution system design**, IEEE, 2008.
- CANO, E.B., **Utilizing fuzzy optimization for distributed generation allocation**”, IEEE, 2007.
- CARPENTIER, J.L., **Contribution a L'etude du Dispatching Economique**, Bull-Soc, Fr Elec., Ser. B3, 431-447, 1962.
- CARPINELLI, G., CELLI, G., PILO, F., RUSSO, A., **Distributed generation siting and sizing under uncertainty**, Porto Power Tech Conference, IEEE, Setembro, 2001.

CARVALHO, M. R., **Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial**. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Carlos, 2006.

CHIRADEJA, P., RAMAKUMAR, R., **An approach to quantify the technical benefits of distributed generation**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, Dezembro 2004

CIGRE. **Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system**. Working Group 37.23, 1999.

COELLO, C. A. C., **An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: state of the art and future trends**, Congress on Evolutionary Computation, Washington D.C., IEEE, 3-13, 1999.

Distributed Power Coalition of America - DPCA, 1998.

EDF - Electricité de France, **Le Calcul Economique et le Systeme Electrique Elementaires**, 133 pages, Paris, Eyrolles, 1979.

FERNANDES, T.S.P., **Um Modelo de Despacho Ótimo de Potência para Sistemas Multiusuários**, Tese de Doutorado, Florianópolis, SC, Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

GANDOMKAR, M., VAKILIAN, M., EHSAN, M., **Optimal distributed generation allocation in distribution network using Hereford ranch algorithm**, IEEE Electrical Machines and Systems, volume 2, Setembro 2005

GOLDBERG, D.E., **Genetic algorithms in search optimization and machine learning**, John Wiley & Sons, United States of America, 1997.

GUPTA, A.K. & SIVAKUMAR, A.I., **Simulation based multiobjective schedule optimization in semiconductor manufacturing**, Winter Simulation Conference, IEEE, 2002.

IEEE 1547.1, **IEEE Standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems**, IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage, julho, 2005.

IJUMBA, N. M., **Application of distributed generation in optimized design and operation of rural power supply networks**, RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE, Piscataway: IEEE, 1999.

KAGAN, N.; ADAMS, R. N.; TER-GAZARIAN, A. G., **Uma abordagem a múltiplos critérios para integração de novas fontes de energia em sistemas elétricos de distribuição**,

Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Operação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, Porto Portugal, IEEE, 1991.

KAGAN, N., SILVA, J. C. B., **Inclusão de geração distribuída na otimização do planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica**, Latin Power & Gas Conference, Rio de Janeiro, 2001.

KHOA, T.Q.D., BINH, P.T.T., TRAN, H.B., **Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems**, IEEE, PSCE, 2006.

LIN, J. G., **Multi-objective problems: pareto-optimal solutions by method of proper equality constraints**, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 21, 1976.

MAZZA, P., **Powering up the Smart Grid: A Northwest Initiative for Job Creation, Energy Security and Clean, Affordable Electricity**, Report from Climate Solution, julho, 2005.

MORSE, J., **Regulatory policy regarding distributed generation by utilities: the impact of restructuring**, International Association for Energy Economics, Cleveland, 1998.

MONTICELLI, A., **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, Editora Edgard Blücher, 1983.

ONS, **Informativo preliminar diário da operação – IPDO**, 2008.

ONS, **Padrões de desempenho da Rede Básica – sub-módulo 2.2**, 2002.

ORTHS, A. et. al., **Dispersed generation in distribution networks: performance simulation based on new planning techniques results**, 17TH International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15, Maio, 2003.

PAIVA, R.R., **Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de Tensão**, Florianópolis, SC, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

PENICHE, R.A., et al, **Avaliação do Impacto da Conexão de Equipamentos de Geração Distribuída Sobre o Sistema Elétrico Enfocando os Indicadores de Qualidade da Energia**, SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007.

PEREIRA JUNIOR, A. M.; MANTOVANI, J.; 2006, **Alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo evolutivo multi-objetivo**, XVI CBA Congresso Brasileiro de Automática. Salvador, 2006.

PFEIFENBERGER, J. P.; AMMANN, P. R.; TAYLOR, G. A., **Distributed generation technology in a newly competitive electric power industry**, American Power Conference, 58., Chicago, v.1, p.523-8, 1996.

PILO, F. et. al., **An integrated tool for optimal active network planning**, 17TH INTERNATIONAL Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15, Maio, 2003.

RODRIGUES, F., **Análise de Metodologias para Alocação de Perdas em Sistemas Elétricos de Potência Operando Segundo Mercado Pool**; Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR, 2007.

SILVA, J. C. B., **Otimização de sistemas de distribuição utilizando geração distribuída**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.

SOUSA, T., **Estudo de planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

SRINIVAS, M.S., **Distribution load flows: a brief review**, proceedings of the 2000, IEEE PES Summer Meeting, Singapore, Janeiro, 2000

SZUVOVIVSKI, ITAMAR, **Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo**, Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 2008.

TORRES, G.L., QUINTANA,V.H., An interior-point method for nonlinear optimal Power flow using voltage rectangular coordinates, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, nº 14, novembro, 1998.

WESTPHAL, H., **Algoritmo genético aplicado à otimização multiobjetivo em redes de distribuição de petróleo e derivados**,. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006.

WILLIS, H.L., SCOTT,W.G., **Distributed Power Generation – Planning and Evaluation**, ed. Dekker, 2000.

ANEXO A- FORMULAÇÃO DO FPO VIA MPI O PROBLEMA DO FPO

O problema de FPO pode ser representado de forma genérica como:

$$\min f(u) \quad (A.1)$$

Sujeito a:

$$g(u) = 0 \quad (A.2)$$

$$h^{\min} \leq h(u) \leq h^{\max} \quad (A.3)$$

onde

u – vetor de variáveis do sistema;

$f(u)$ – função objetivo a ser otimizada;

$g(u)$ – vetor de restrições de igualdade;

$h(u)$ – vetor de restrições de desigualdade.

Para utilizar os métodos de Pontos Interiores aplicam-se ao problema (A.1) à (A.3) os seguintes procedimentos:

- a. Transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga.

Desta forma, as restrições passam a ser representadas da seguinte maneira:

$$h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (A.4)$$

$$h(u) - h^{\max} + s^{\max} = 0 \quad (A.5)$$

onde:

s^{\min} – vetor de variáveis de folga mínimas estritamente positivas;

s^{\max} – vetor de variáveis de folga máximas estritamente positivas.

- b. Introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo.

A fim de se representar as restrições de não negatividade das variáveis de folga, o problema é modificado com a introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo. A função barreira penaliza as estimativas de solução que se encontram próximas aos limites das desigualdades, ou ainda, associadas às variáveis de folga próximas de zero.

O problema modificado passa a ser assim representado:

$$\min f(u) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{\min}) + \ln(s_i^{\max})] \quad (A.6)$$

Sujeito a:

$$g(u) = 0 \quad (A.7)$$

$$h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (A.8)$$

$$h(u) - h^{\max} + s^{\max} = 0 \quad (A.9)$$

onde

$ndes$ – número de restrições de desigualdade;

μ – parâmetro barreira ($\mu \geq 0$).

Logo, a função Lagrangeana associada a este problema é:

$$L(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}, s^{\min}, s^{\max}) = f(u) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{\min}) + \ln(s_i^{\max})] + \lambda^T \cdot g(u) + (\pi^{\min})^T \cdot [h(u) + h^{\min} - s^{\min}] + (\pi^{\max})^T \cdot [h(u) - h^{\max} + s^{\max}] \quad (A.10)$$

onde

λ – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade com dimensão ($nig \times 1$);

π^{\min} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos com dimensão ($ndes \times 1$);

π^{\max} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites máximos com dimensão ($ndes \times 1$);

nig – número de restrições de igualdade.

Portanto, o novo problema de otimização passa a ser:

$$\min L(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}, s^{\min}, s^{\max}) \quad (A.11)$$

Sujeito a:

$$s^{\min} \geq 0, \quad s^{\max} \geq 0, \quad \pi^{\min} \geq 0, \quad \pi^{\max} \geq 0 \quad (B.12)$$

Sendo as restrições (A.12) impostas para que a equivalência com o problema (A.1) a (A.3) seja mantida.

CONDIÇÕES DE OTIMALIDADE

Um ponto $z = [u^T \lambda^T (\pi^{\min})^T (\pi^{\max})^T (s^{\min})^T (s^{\max})^T]$ é solução do problema (A.11) e (A.12) somente se (LUENBERGER, 1989):

a. Satisfaz as condições necessárias de otimalidade de primeira ordem, ou condições de Karush-Kuhn-Tucker – KKT.

Para que as expressões matemáticas presentes nas condições de KKT e nos algoritmos descritos sejam compactas foi usado o operador ∇ para representar derivadas parciais de funções, desta forma tem-se:

$$\nabla_u z = 0 \Rightarrow \nabla_u f(u) + [\nabla_u g(u)]^T \cdot \lambda + [\nabla_u h(u)]^T \cdot (\pi^{\min} + \pi^{\max}) = 0 \quad (A.13)$$

$$\nabla_u L(z) = 0 \Rightarrow g(u) = 0 \quad (A.14)$$

$$\nabla_{\pi^{\min}} L(z) = 0 \Rightarrow h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\nabla_{\pi^{\max}} L(z) = 0 \Rightarrow h(u) - h^{\max} - s^{\max} = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\nabla_{s^{\min}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - S^{\min} \cdot \pi^{\min} = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\nabla_{s^{\max}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$s^{\min} \geq 0, \quad s^{\max} \geq 0, \quad \pi^{\min} \geq 0, \quad \pi^{\max} \geq 0 \quad (\text{A.19})$$

sendo

$e = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, com dimensão ($ndes \times 1$);

S^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\min} ;

S^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\max} .

b. Se a Hessiana do Lagrangeano L:

$$L'(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}) = f(u) + \lambda^T \cdot g(u) + \pi_A^T \cdot h_A(u) \quad (\text{A.20})$$

onde

$h_A(u)$ – vetor das restrições de desigualdade ativas;

π_A^T – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade ativas;

S^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\min} ;

S^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\max} .

O Método de Pontos Interiores se concentra em obter um ponto estacionário, isto é, que satisfaça as condições necessárias de otimalidade do item (a). Para se garantir que o ponto obtido seja um mínimo de global de (A.1) a (A.3) as condições suficientes do item (b) devem ser testadas após a convergência do método.

No procedimento usado, entretanto, considera-se como ótimo o ponto solução das condições de KKT.

ALGORITMOS PRIMAL DUAL DE PONTOS INTERIORES

Após a transformação das restrições de desigualdade em igualdades, por meio da introdução de variáveis de folga e adição da função barreira logarítmica à função objetivo como forma de garantir a não negatividade dessas variáveis. Os passos seguintes

consistem em se obter os pontos estacionários da função Lagrangeana, utilizando-se o Método de Newton, e estabelecer critérios para atualização do parâmetro barreira, para inicialização das variáveis e teste de convergência.

Obtenção dos Pontos Estacionários

O primeiro passo na obtenção dos pontos que satisfazem a função Lagrangeana consiste em se fazer uma estimativa desta solução pela linearização das Equações (A.13) a (A.18) utilizando-se o Método de Newton. Os incrementos obtidos em cada iteração deste método não podem ser usados diretamente no vetor z , pois os mesmos podem violar as restrições de desigualdade. Assim, esses incrementos devem ser testados e, se necessário, modificados a fim de sempre se manter o vetor z dentro da região de factibilidade do problema.

As etapas que devem ser seguidas a fim de se obter os pontos estacionários são as seguintes:

a. Inicialização das Variáveis

A fim de se começar o processo de otimização, é necessário a obtenção de uma estimativa inicial para as variáveis do problema. A escolha é feita de tal modo que as variáveis sejam estritamente internas aos limites impostos pelas restrições de desigualdade do problema. Para tanto, as variáveis u são inicializadas pela metade da soma de seus valores máximos e mínimos; posteriormente, as variáveis de folga são calculadas a partir das Equações (A.15) e (A.16) e, arbitrando um valor inicial para o parâmetro barreira μ , os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade são calculados a partir das Equações (A.17) e (A.18). Para os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade estimam-se valores quaisquer, como por exemplo, o vetor unitário.

b. Método de Newton

O sistema de Equações (A.13) a (A.18) pode ser representado de forma como:

$$\rho(z) = 0 \quad (\text{A.21})$$

Tomando uma aproximação linear do sistema (A.21) no ponto z^* tem-se:

$$\rho(z^* + \Delta z) = \rho(z^*) + \nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z \quad (\text{A.22})$$

Como Δz deve ser tal que $\rho(z^* + \Delta z) = 0$, da Equação (A.22) tem-se que:

$$\nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z = -\rho(z^*) \quad (\text{A.23})$$

Em termos das variáveis do problema: u , λ , π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} a Equação (A.23) pode ser escrita como:

$$W \cdot \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi^{\min} \\ \Delta \pi^{\max} \\ \Delta s^{\min} \\ \Delta s^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_u f(u) + [\nabla_u g(u)]^T \cdot \lambda + [\nabla_u h(u)]^T \cdot (\pi^{\min} + \pi^{\max}) \\ g(u) \\ h(u) - h^{\min} - s^{\min} \\ h(u) - h^{\max} - s^{\max} \\ -\mu \cdot e - S^{\min} \cdot \pi^{\min} \\ -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_u L \\ \nabla_\lambda L \\ \nabla_{\pi^{\min}} L \\ \nabla_{\pi^{\max}} L \\ \nabla_{s^{\min}} L \\ \nabla_{s^{\max}} L \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

onde:

W – matriz Hessiana de dimensão $(nz \times nz)$;

nz – número total de variáveis em z

Ou seja:

$$W = \begin{bmatrix} L_{uu} & L_{u\lambda} & L_{u\pi^{\min}} & L_{u\pi^{\max}} & 0 & 0 \\ [L_{u\lambda}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [L_{u\pi^{\min}}]^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ [L_{u\pi^{\max}}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -S^{\min} & 0 & -\Pi^{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S^{\max} & 0 & \Pi^{\max} \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

Sendo:

$$L_{uu} = \nabla_{uu}^2 L = \nabla_{uu}^2 f(u) + \sum_{i=1}^{nig} \lambda_i \cdot \nabla_{uu}^2 g_i(u) + \sum_{j=1}^{ndes} (\pi_j^{\max} + \pi_j^{\min}) \cdot \nabla_{uu}^2 h_j(u) \quad (\text{A.26})$$

$$L_{u\lambda} = [L_{\lambda u}]^T = \nabla_{u\lambda}^2 L = [\nabla_u g(u)]^T \quad (\text{A.27})$$

$$L_{u\pi^{\min}} = [L_{\pi^{\min} u}]^T = \nabla_{u\pi^{\min}}^2 L = [\nabla_u h(u)]^T \quad (\text{A.28})$$

$$L_{u\pi^{\max}} = [L_{\pi^{\max} u}]^T = \nabla_{u\pi^{\max}}^2 L = [\nabla_u h(u)]^T \quad (\text{A.29})$$

$$L_{s^{\min} \pi^{\min}} = \nabla_{s^{\min} \pi^{\min}}^2 L = -S^{\min} \quad (\text{A.30})$$

$$L_{s^{\max} \pi^{\max}} = \nabla_{s^{\max} \pi^{\max}}^2 L = S^{\max} \quad (\text{A.31})$$

$$L_{s^{\min} s^{\min}} = \nabla_{s^{\min} s^{\min}}^2 L = -\Pi^{\min} \quad (\text{A.32})$$

$$L_{s^{\max} s^{\max}} = \nabla_{s^{\max} s^{\max}}^2 L = \Pi^{\max} \quad (\text{A.33})$$

onde

Π^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\min} ;

Π^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\max} ;

I – matriz identidade.

c. Atualização das Variáveis Primais e Duais

A determinação do ponto ótimo se faz através de um processo iterativo. A cada iteração, o sistema linear representado em (A.24) é resolvido, e, logo após, é determinado o comprimento do passo nos espaços primal (α_p) e dual (α_d), de modo que as variáveis de

folga sejam todas positivas e os multiplicadores de Lagrange sejam tais que: $\pi^{\min} \leq 0$ e $\pi^{\max} \geq 0$. Desta forma, α_p e α_d são expressos como:

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s_i^{\max} < 0} \frac{-s_i^{\max}}{\Delta s_i^{\max}}, \min_{\Delta s_i^{\min} < 0} \frac{-s_i^{\min}}{\Delta s_i^{\min}}, 1 \right] \quad (\text{A.34})$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta \pi_i^{\max} < 0} \frac{-\pi_i^{\max}}{\Delta \pi_i^{\max}}, \min_{\Delta \pi_i^{\min} < 0} \frac{-\pi_i^{\min}}{\Delta \pi_i^{\min}}, 1 \right] \quad (\text{A.35})$$

Após o cálculo dos passos primal e dual, a nova aproximação para a solução ótima pode ser obtida pela seguinte atualização:

$$u^{i+1} = u^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta u \quad (\text{A.36})$$

$$(s^{\min})^{i+1} = (s^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\min} \quad (\text{A.37})$$

$$(s^{\max})^{i+1} = (s^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\max} \quad (\text{A.38})$$

$$\lambda^{i+1} = \lambda^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \lambda \quad (\text{A.39})$$

$$(\pi^{\min})^{i+1} = (\pi^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\min} \quad (\text{A.40})$$

$$(\pi^{\max})^{i+1} = (\pi^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\max} \quad (\text{A.41})$$

onde

σ – constante para garantir a interioridade da nova estimativa de solução, sendo fixada em 0,9995.

d. Atualização do Parâmetro Barreira

O último passo dentro de cada iteração é recalculer o valor do parâmetro barreira μ . Com os valores de π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} , o cálculo do parâmetro μ é baseado no decréscimo do *gap* de dualidade:

$$\mu = \frac{(s^{\max})^T \cdot \pi^{\max} - (s^{\min})^T \cdot \pi^{\min}}{2 \cdot n \cdot \beta} \quad (\text{A.42})$$

onde

n – número total de variáveis primais e duais;

β – fator de aceleração ($\beta > 1$).

e. Critérios de Convergência

A solução do problema é encontrada quando as equações que representam as condições de otimalidade (A.13) a (A.18) são satisfeitas e o *gap* de dualidade ou parâmetro de barreira é nulo (menor ou igual a uma tolerância especificada). Portanto, os critérios de convergência são:

$$\mu \leq \varepsilon_\mu \quad (\text{A.43})$$

$$\max \left\| \nabla L \right\|_\infty \leq \varepsilon_L \quad (\text{A.44})$$

onde

$\left\| \nabla L \right\|_\infty$ – norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_L – tolerância da norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_μ – tolerância do parâmetro barreira.

ANEXO B- DADOS DO SISTEMA

SISTEMA DE 70 BARRAS DE BARAN E WU (1989)

TABELA B.1 DADOS DAS CARGAS PARA O SISTEMA DE 70 BARRAS

Barra	P [kW]	Q [kvar]	Barra	P [kW]	Q [kvar]
1	0	0	36	6	4
2	0	0	37	26	18,55
3	0	0	38	26	18,55
4	0	0	39	0	0
5	0	0	40	24	17
6	0	0	41	24	17
7	2,6	2,2	42	1,2	1
8	40,4	30	43	0	0
9	75	54	44	6	4,3
10	30	22	45	0	0
11	28	19	46	39,22	26,3
12	145	104	47	39,22	26,3
13	145	104	48	0	0
14	8	5,5	49	79	56,4
15	8	5,5	50	384,7	274,5
16	0	0	51	384,7	274,5
17	45,5	30	52	40,5	28,3
18	60	35	53	3,6	7,2
19	60	35	54	4,35	3,5
20	0	0	55	26,4	19
21	1	0,6	56	24	17,2
22	114	81	57	0	0
23	5,3	3,5	58	0	0
24	0	0	59	0	0
25	28	20	60	100	72
26	0	0	61	0	0
27	14	10	62	1244	888
28	14	10	63	32	23
29	26	18,6	64	0	0
30	26	18,6	65	227	162
31	0	0	66	59	42
32	0	0	67	18	13
33	0	0	68	18	13
34	14	10	69	28	20
35	19,5	14	70	28	20

TABELA B.2– DADOS DAS LINHAS PARA O SISTEMA DE 70 BARRAS

De	Para	R [Ω]	X [Ω]	De	Para	R [Ω]	X [Ω]
1	2	0,0005	0,0012	4	37	0,0044	0,0108
2	3	0,0005	0,0012	37	38	0,0640	0,1565
		1.00E-	1.00E-				
3	4	10	10	38	39	0,1053	0,1230
4	5	0,0015	0,0036	39	40	0,0304	0,0355
5	6	0,0251	0,0294	40	41	0,0018	0,0021
6	7	0,3660	0,1864	41	42	0,7283	0,8509
7	8	0,3811	0,1941	42	43	0,3100	0,3623
8	9	0,0922	0,0470	43	44	0,0410	0,0478
9	10	0,0493	0,0251	44	45	0,0092	0,0116
10	11	0,8190	0,2707	45	46	0,1089	0,1373
11	12	0,1872	0,0619	46	47	0,0009	0,0012
12	13	0,7114	0,2351	5	48	0,0034	0,0084
13	14	10,300	0,3400	48	49	0,0851	0,2083
14	15	10,440	0,3450	49	50	0,2898	0,7091
15	16	10,580	0,3496	50	51	0,0822	0,2011
16	17	0,1966	0,0650	9	52	0,0928	0,0473
17	18	0,3744	0,1238	52	53	0,3319	0,1114
18	19	0,0047	0,0016	10	54	0,1740	0,0886
19	20	0,3276	0,1083	54	55	0,2030	0,1034
20	21	0,2106	0,0696	55	56	0,2842	0,1447
21	22	0,3416	0,1129	56	57	0,2813	0,1433
22	23	0,0140	0,0046	57	58	15,900	0,5337
23	24	0,1591	0,0526	58	59	0,7837	0,2630
24	25	0,3463	0,1145	59	60	0,3042	0,1006
25	26	0,7488	0,2475	60	61	0,3861	0,1172
26	27	0,3089	0,1021	61	62	0,5075	0,2585
27	28	0,1732	0,0572	62	63	0,0974	0,0496
3	29	0,0044	0,0108	63	64	0,1450	0,0738
29	30	0,0640	0,1565	64	65	0,7105	0,3619
30	31	0,3978	0,1315	65	66	10,410	0,5302
31	32	0,0702	0,0232	12	67	0,2012	0,0611
32	33	0,3510	0,1160	67	68	0,0047	0,0014
33	34	0,8390	0,2816	13	69	0,7394	0,2444
34	35	17,080	0,5646	69	70	0,0047	0,0016
35	36	14,740	0,4873				